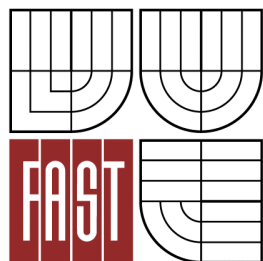




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

TRVANLIVOST SANAČNÍCH HMOT PRO ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE S VYŠŠÍ ODOLNOSTI PROTI POŽÁRU

DURABILITY OF REPAIR MATERIALS WITH HIGHER FIRE RESISTANCE FOR
CONCRETE STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÁCLAV POČEKALLO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Václav Počekajlo
Název	Trvanlivost sanačních hmot pro železobetonové konstrukce s vyšší odolností proti požáru
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Drochytka, R., Dohnálek, J., Bydžovský, J., Pumpr, V., Dufka, A., Dohnálek, P.: Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III. 1. Brno, Sdružení pro sanace betonových konstrukcí. 2012. 265 p. ISBN 978-80-260-2210-7.

Bodnárová, L. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002.

Matoušek, M., Drochytka, R. Atmosférická koroze betonů. Vyd. 1. IKAS. Praha, 1998.

Kropp, J., Hilsdorf, H., K. Performance criteria for concrete durability. RILEM, London, 1995.

Voves, B. Trvanlivost konstrukcí z předpjatého betonu. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.

ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky, 2000.

www.sciencedirect.com

Zásady pro vypracování

Trvanlivost stavebních materiálů představuje z hlediska dlouhodobého časového horizontu – životnosti staveb jeden z rozhodujících faktorů. Správkové hmoty pro železobetonové konstrukce s vyšší odolností vůči požáru nejsou v tomto ohledu výjimkou. Cílem práce je studium trvanlivosti sanačních malt, vhodných pro sanace konstrukcí odolných působení extrémních teplot, vůči působení chemických agresivních vlivů. V rámci vypracování diplomové práce jsou požadovány následující výstupy:

1. Vytipování běžně působících agresivních prostředí, kterým musí správkové hmoty železobetonových konstrukcí odolat.
2. Rešerše odborných tuzemských i zahraničních publikací zaměřených na problematiku korespondující s tématem diplomové práce.
3. Příprava zkušebních těles, volba agresivních prostředí simulujících reálné vlivy expozice staveb, zejména sírany, chloridy apod.
4. Sledování míry degradace malt prostřednictvím fyzikálně mechanických zkoušek i fyzikálně-chemických analýz.
5. Zhodnocení teoretických poznatků i výstupů experimentální části práce, včetně vyvození patřičných závěrů.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Vedoucí diplomové práce

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá studiem trvanlivosti a degradace správkových malt pro železobetonové konstrukce. V teoretické části je provedena rešerše poznatků o chování správkových malt vystavených koroznímu prostředí o různé době expozice a vybraným vysokým teplotám. Jsou zde popsány děje probíhající ve správkových maltách během jejich zatěžování při vysokých teplotách nebo při jejich vystavení chemicky agresivnímu prostředí. V praktické části jsou navrženy receptury na bázi směsného cementového pojiva s obsahem strusky a popílku. Předmětem výzkumu bylo zjištění trvanlivosti navržených sanačních malt a určení jejich vhodnosti pro využití na železobetonové konstrukce, které mohou být vystaveny synergickému působení chemicky agresivního prostředí spolu s vysokou teplotou představující vznik požáru.

Klíčová slova:

Beton, železobeton, sanace, správkové hmoty, cementový kompozit, rozptýlená výztuž, polypropylenová vlákna, trvanlivost, korozní prostředí, teplotní zatěžování, působení agresivních látek, degradace betonu, koroze výztuže, karbonatace, sulfatace, rozpad vlivem působení mrazu.

Abstrakt:

This dissertation deals with the study of durability and degradation repair mortars for reinforced concrete structures. In its theoretical part, there are the research findings on the behavior of repair mortars exposed to corrosive environments with different exposure time and selected high temperatures. Processes occurring in repair mortars during their loading at high temperatures or when exposed to chemically aggressive environments are described. We can find recipes designed for cementitious binder based with a specific replacement using slag or fly ash in its practical part. The object of the research was to determine the durability of the proposed repair mortars, and determine their suitability for use on concrete structures, which may be exposed to a synergistic effect of chemically aggressive environments with high temperatures simulating fire.

Keywords:

Concrete, reinforced concrete, concrete rehabilitation, repair materials, cement composite, dispersed reinforcement, polypropylene fibers, durability, corrosive environment, thermal loading, aggressive substances impact, concrete degradation, reinforcement corrosion, carbonation, sulfation, frost degradation.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Václav Počekajlo *Trvanlivost sanačních hmot pro železobetonové konstrukce s vyšší odolností proti požáru*. Brno, 2015. 110 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2015

.....
podpis autora

Bc. Václav Počekajlo

Poděkování:

Touto cestou bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. a Ing. Tomáši Melicharovi, Ph.D. za jejich poskytnuté rady, cenné připomínky a především za jejich čas věnovaný vedení při zpracování této diplomové práce.

V Brně dne 16. 1. 2015

Bc. Václav Počekajlo

Obsah

Úvod	9
1 Cíl práce	11
A) Teoretická část	12
2 Historie využívání sanačních hmot a sanačních technologií v ČR i zahraničí.....	12
3 Mechanické vlastnosti správkových malt s částečnou náhradou cementového pojiva	13
4 Odolnost správkových malt vůči požáru	18
4.1 Děje probíhající v ŽB konstrukci vystavené účinkům požáru	20
4.2 Požární odolnost – Eurokód, Normy	22
5 Odolnost správkových malt vůči chemicky agresivnímu prostředí	27
6 Děje probíhající v ŽB konstrukci vystavené účinkům chemicky agresivních látek	31
6.1 Chemická koroze cementového kompozitu	32
6.1.1 Degradace cementových kompozitů vlivem působení agresivního plynného prostředí – atmosférická koroze:	32
6.1.2 Degradace cementových kompozitů vlivem působení agresivního kapalného prostředí	36
6.1.3 Degradace cementových kompozitů vlivem působení koroze tuhými látkami	37
6.2 Biologická koroze cementového kompozitu.....	37
6.3 Fyzikálně mechanické vlivy na trvanlivost cementových kompozitů	38
6.4 Degradace cementových kompozitů vlivem chloridů.....	38
6.5 Degradace cementových kompozitů vlivem síranů	39
6.6 Degradace cementových kompozitů vlivem hořčnatých iontů	40
6.7 Degradace cementových kompozitů vlivem vápenatého rozpínání.....	41
6.8 Degradace cementových kompozitů vlivem dusičnanů.....	41
7 Trvanlivost sanačních malt pro železobetonové konstrukce.....	42
7.1 Definice trvanlivosti	42
7.2 Trvanlivost cementových kompozitů s portlandskými směsnými cementy	42
7.3 Trvanlivost alkalicky aktivovaných pojiv.....	44
B) Experimentální část.....	45
8 Metodika práce.....	45
9 Použité zkušební metody a postupy	46
10 Výběr vhodných surovin.....	54
11 Návrh a ověření vhodnosti složení receptur.....	60
11.1 Stanovení optimálního poměru pojiva a plniva	61
11.2 Stanovení optimální dávky polymerní přísady	62

11.3	Stanovení optimální dávky příměsi	62
11.4	Stanovení optimálního poměru dvou typů kameniv	62
11.5	Výběr typu rozptýlené výztuže	63
11.6	Receptury pro testování trvanlivosti správkových malt.....	64
12	Podmínky expozice zkušebních těles.....	65
13	Vizuální posouzení zkušebních těles v průběhu testování.....	68
14	Výsledky testování sanačních malt	71
14.1	Fyzikálně-mechanické zkoušky	71
14.1.1	Vývoj vlastností a tepelné odolnosti v čase	71
14.1.2	Vliv chemicky agresivního prostředí tepelně nezatížených malt.....	75
14.1.3	Expozice v chemicky agresivním prostředí s následným teplotním zatížením	79
14.2	Fyzikálně-chemické analýzy	96
	Závěr	98
	Literatura	100
	Seznam tabulek.....	104
	Seznam grafů	105
	Seznam obrázků.....	108
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	109
	Seznam příloh	110

Úvod

Beton, respektive železobeton je jeden z nejrozšířenějších stavebních materiálů v současnosti, který je využíván hlavně díky jeho konstrukční tvárnosti, vodotěsnosti, vysoké únosnosti a dobré trvanlivosti spolu s požární odolností ke stavbě částí jak inženýrských, tak i průmyslových staveb. Konstrukce vyrobené z monolitického i prefabrikovaného betonu dosahují poměrně vysoké životnosti, která je ovšem závislá jednak na vlastní výrobě betonu, tj. na kvalitě vlastní betonové směsi, způsobu zpracování a ošetřování čerstvého betonu, ale i na vlastnostech prostředí, kterým je daná konstrukce z betonu vystavena. Reakcí na vady a poruchy betonových konstrukcí, které mohou být způsobené mechanickými, fyzikálními, chemickými vlivy, popřípadě i jejich synergickému působení, by měla být sanace.

Sanace staveb z betonu resp. železobetonu jako jsou mosty, tunely, chladicí věže a jiné inženýrské a průmyslové stavby je stále se rozvíjející oblast stavebního průmyslu, jejímž hlavním cílem je oprava a ochrana staveb, které už dosahují své maximální životnosti nebo u nichž došlo k situaci, již má za následek snížení původní únosnosti nebo pokles požadovaných vlastností betonu. Pojem sanace zahrnuje diagnostiku stávajícího stavu materiálů a konstrukcí, volbu technologického postupu opravy včetně její realizace, ale také kontrolu kvality vlastní sanace.

Na správkové malty mohou působit vnější vlivy, při nichž může dojít k degradaci stavebního materiálu, která v důsledku zapříčiní snížení životnosti stavby. Příkladem takovéto situace může být vznik požáru, kdy vlivem vysoké teploty může dojít k destrukci konstrukce a následně tak i k ohrožení lidského života. Výrazné snížení vlastností správkových malt může být zapříčiněno také působením chemicky agresivních plynů, kapalin a tuhých látek. V době, kdy se klade velký důraz na bezpečnost stavebního díla během jeho užívání, jsou inženýři nuceni navrhovat stále odolnější materiály.

Vývoj těchto materiálů je ovlivněn nejen jejich požadovanými vlastnostmi, ale také kritérii ekologickými a ekonomickými. Jednou z možností, jak splnit obě kritéria by mohlo být využití alternativních surovin pro snížení obsahu cementu, u kterého při výrobě vzniká velké množství emisí v podobě CO_2 . Jako vhodná částečná náhrada cementového pojiva se díky svým dosahovaným mechanickým vlastnostem tj. jak z hlediska zlepšení odolnosti proti chemicky agresivnímu prostředí, tak jeví využití vysokopecní strusky a vysokoteplotního popílku. Jako jedna z dalších možností se nabízí využití elektrárenského popílku i pro výrobu umělého spékaného kameniva agloporitu a následné využití tohoto kameniva pro vývoj

jemnozrnné sanační malty. Výše zmíněné složky představují ložiska pojiva a plniva o dostatečné surovinové základně, která by splňovala kritéria ekonomicky výhodných surovin zachovávající fyzikálně mechanické vlastnosti správkových malt, a zároveň by zužitkování těchto surovin mělo příznivý dopad na životní prostředí. Správkové malty skýtají možnost využití těchto alternativních surovin, kdy při vhodném návrhu receptur by bylo možné vytvořit maltu s vyšší chemickou i požární odolností, jež zaručí konstrukční stabilitu po dobu požáru, která je stanovena pro bezpečnou evakuaci osob.

1 Cíl práce

Cílem diplomové práce je studium, návrh a optimalizace receptur správkových malt na bázi cementového směsného pojiva pro železobetonové konstrukce, u nichž se předpokládá odolnost vůči působení chemicky agresivního prostředí s následnou expozicí extrémně vysokým teplotám. Pozornost je také věnována studiu degradace a trvanlivosti vyvíjených sanačních malt, které z dlouhodobého časového hlediska reprezentují jedny z hlavních faktorů životnosti stavby.

Vzhledem k rozsahu diplomové práce je tato členěna do několika dílčích cílů. Nejprve bylo třeba pozornost soustředit na aktualizaci podstatných teoretických poznatků z dostupných informačních zdrojů (odborná literatura, vědecké články atd.). Důraz byl kladen na informace týkající se mechanických vlastností a chování správkových malt, jež jsou vystaveny působení chemicky agresivního prostředí a šokově extrémně vysokým teplotám.

Dílčím záměrem práce je také praktické ověření teoretických poznatků na nově navržených recepturách jemnozrnných správkových hmot. Cílem praktické části diplomové práce tedy je studium základních parametrů ovlivněných chemicky agresivním prostředím s následným šokovým působením vysokých teplot a to i v dlouhodobějším časovém horizontu. Pozornost bude soustředěna na několik vybraných typů vybraných agresivních prostředí, které by reálně simulovaly vystavení správkové malty ve stavební konstrukci.

A) Teoretická část

2 Historie využívání sanačních hmot a sanačních technologií v ČR i zahraničí

V zahraničí literatuře se pojem technologie sanace objevuje již během 70. let 19. století. Důvod, proč se technologie sanace vyvíjela zhruba až po sto letech od začátku masivního využívání betonu a železobetonu, vyplývá z historie mletí cementu. V první polovině 20. století se totiž využívalo velmi hrubě mletého cementu, díky kterému pevnost betonu po 28denním stáří stoupala v řádu až několika desítek procent, což se z hlediska trvanlivosti projevilo nárůstem pevností betonu v čase. Využití potenciálu betonu v tenkostěnných konstrukcích, kde nebyl kladen důraz na dostatečnou krycí vrstvu, vedlo k zapříčinění degradace betonu a následně i korozi výztuže v železobetonu v některých konstrukcích již po deseti letech.

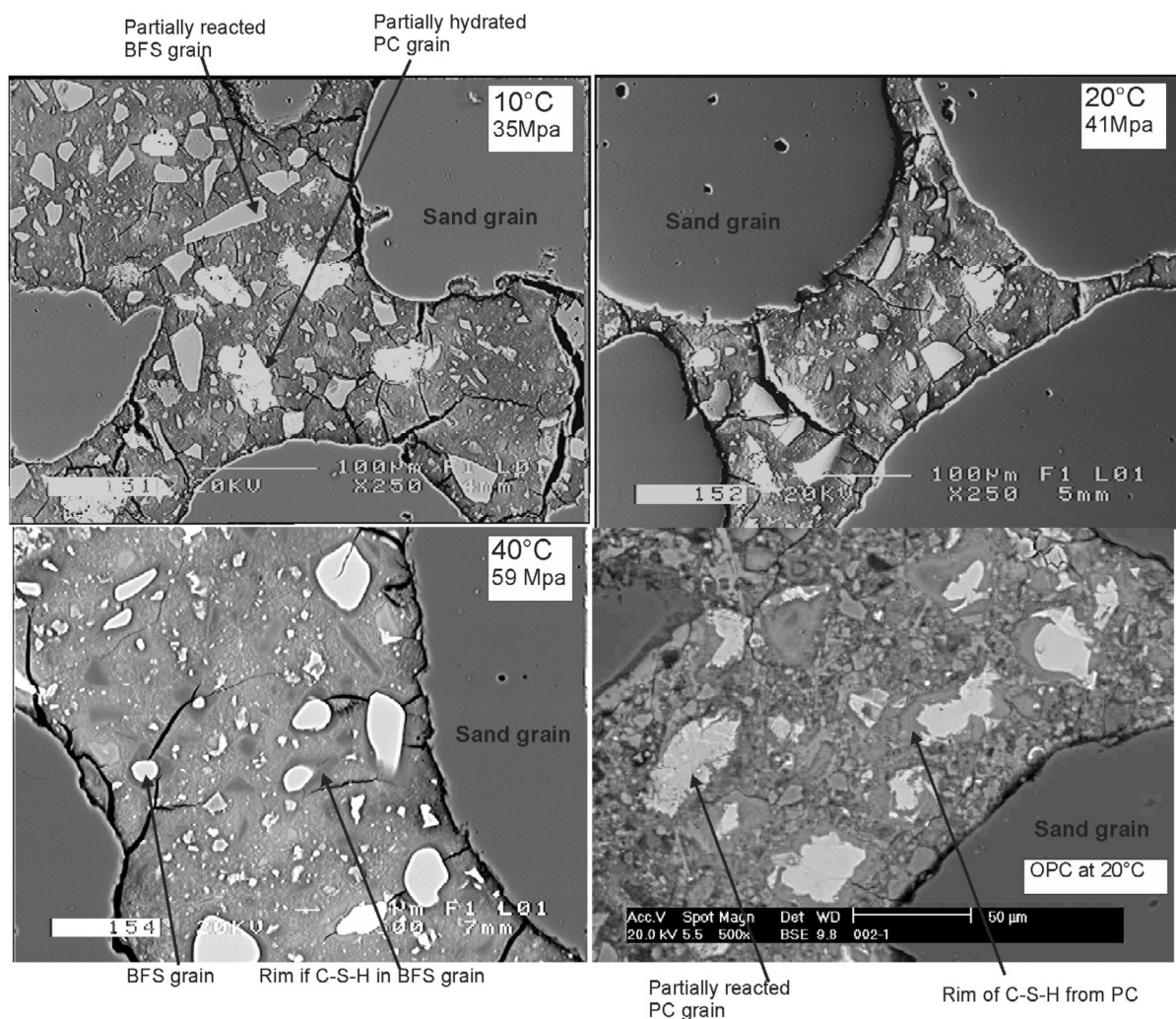
Sanace betonových a železobetonových konstrukcí je v ČR poměrně mladý obor, který prakticky teprve v 90. letech 20. století začal řešit problematiku provádění sanací bez normativních podkladů. Z tohoto důvodu vznikly různé oborové a podnikové normy, které se touto problematikou zabývaly. [16]

Je to zejména publikace „Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací“, kapitola 31 Opravy betonových konstrukcí. V roce 2012 byla vydána ucelená publikace v oboru sanací betonu a železobetonu s názvem „Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TPSSBK III“.

Publikace PN 009 (do roku 2004 PN 9906) ČEZ, a.s. „Technické podmínky pro přípravu a kontroly oprav železobetonových konstrukcí ve výrobnách ČEZ, a.s., - chladicí věže a komíny“, jejíž první znění bylo připraveno v roce 1996. Dále publikace autorů Bilčík J. a Dohnálek J. „Sanace betonových konstrukcí“ a Emmons P. H., Drochytka R. a Jeřábek Z. „Sanace a údržba betonu v ilustracích“. [1]

3 Mechanické vlastnosti správkových malt s částečnou náhradou cementového pojiva

Nahrazení portlandského cementu vysokopecní struskou je výhodné zejména pro výrobu stavebních materiálů, které mají mít zlepšeny jak dlouhodobé mechanické vlastnosti, tak i trvanlivost při relativně nižších nákladech. Hlavní nevýhodou při použití vysokopecní strusky je její nízká počáteční pevnost, kterou nelze využít při vysokých zatíženích. Při zvýšení zatížení strusky se zásaditost aktivačního prostředí snižuje, což negativně ovlivňuje vývoj pevnosti. Pro dlouhodobé zlepšení pevnosti se jeví jako nejúčinnější náhrada portlandského cementu vysokopecní struskou, a to zhruba z 50 %. Pevnosti mohou být zvýšeny různými prostředky, například i zvýšením reaktivity samotné granulované strusky. Jedním z řešení by mohlo být zvýšení povrchové plochy strusky, ale je třeba hledat kompromis, pokud jde o náklady na zvyšování reaktivity. Další metody zahrnují vytvrzování při vyšších teplotách nebo se zabírají použitím alkalického činidla. [21]



Obrázek 1: Snímky z REM v režimu zpětně odražených elektronů analyzovaných malt ve stáří 90 dnů. [BSF – vysokopecní struska; Partially reacted BSF grain - částečně reagovaná BSF zrna; Partially hydrated PC grain - částečně zhydratovaná PC zrna; BFS grain – BSF zrna; Rim if C-S-H in BSF grain - okraj C-S-H v BSF zrn; Partially reacted PC grain - částečně zreagovaná PC zrna; Rim of C-S-H from PC - okraj C-S-H z PC. Sand Grain – zrno písku]. [21]

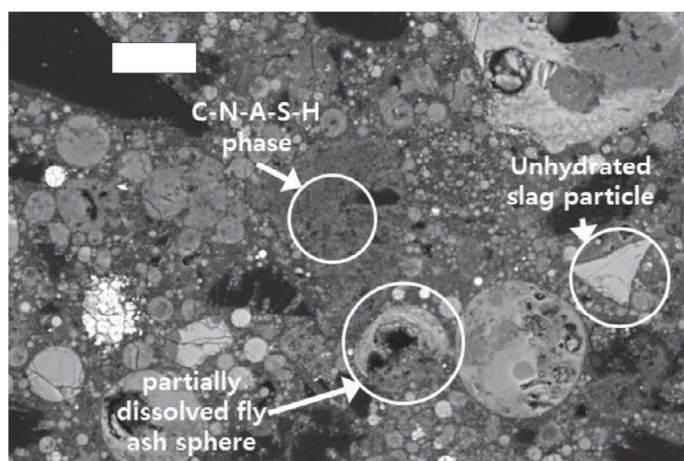
Navzdory skutečnosti, že vysokopecní struska nevykazuje žádné nebo jen malé tmelící schopnosti, je alkalicky aktivovaná struska v přítomnosti správného aktivátoru schopna získat dobré mechanické vlastnosti, kdy může být dosaženo velmi vysokých pevností v tlaku. Alkalicky aktivovaná struska použitá jako pojivo vykazuje naopak mnohem lepší vlastnosti, než jakých je dosahováno při použití běžného pojiva z portlandského cementu, a to jak z hlediska mechanických pevností, tak z hlediska odolnosti vůči chemicky agresivnímu prostředí. Zároveň je u tohoto pojiva dosahováno také lepších výsledků při

tepelném zatěžování, kdy je simulován požár. Také vazba mezi pastou a kamenivem či ocelovou výztuží je u alkalicky aktivovaných cementových kompozitů mnohem lepší než u pojiva z portlandského cementu. Avšak tyto cementové kompozity oproti cementovým kompozitům z portlandského cementu vykazují výrazně vyšší smrštění. Jak vyplývá z povahy tohoto materiálu, jako je jemnost strusky, typ a množství aktivátoru, načasování přidání aktivátoru, chemické a minerální příměsi, přídavek vápna, vody, vytvrzovací podmínky a celkový objem cementového kompozitu, mají uvedené faktory významný vliv na vlastnosti takto navržených alkalicky aktivovaných cementových kompozitů.

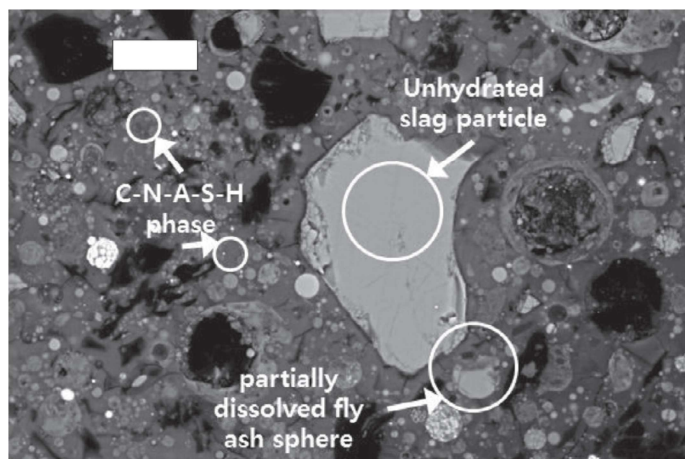
Hydratační procesy u alkalicky aktivované strusky a portlandského cementu si jsou navzájem podobné, ale mechanismy hydratace jsou odlišné. Hlavním produktem reakce u alkalicky aktivované strusky je C-S-H gel podobný tomu, který lze nalézt i u procesu hydratace portlandského cementu, avšak s nižším poměrem Ca/Si, který se pohybuje kolem 0,7. Hydratační proces alkalicky aktivované strusky je ovlivněn obsahem Na₂O a oxidem křemičitým. Vzhledem k tomu, že aktivační energie je u reakce alkalicky aktivované strusky vyšší než u portlandského cementu, dochází při vysokých teplotách vytvrzování ke zlepšení pevností cementových kompozitů právě u alkalicky vytvrzované strusky. [24]

Z výsledků testů alkalicky aktivovaného popílku nebo strusky vyplývá, že autogenní smrštění malt připravených z tohoto pojiva se vyskytuje hlavně v důsledku vlastního vysoušení spíše ve ztvrdlém stavu než autogenní smrštění vzniklé vlivem chemického smrštění v čerstvém stavu malty. Malty vyrobené z alkalicky aktivovaného popílku nebo strusky vykazovaly vyšší smrštění sušením, než tomu bylo u malt vyrobených z běžných pojiv na bázi portlandského cementu, což mohlo být způsobeno vyšším pórovitým objemem alkalicky aktivovaných pojiv. Hlavním produktem malty připravené z alkalicky aktivovaných pojiv popílku a strusky byly C-N-A-S-H gely s atomovými poměry Ca/Si 0,26 - 0,53, což je nižší než u alkalicky aktivované strusky, kde se atomové poměry pohybovaly v rozmezí 0,8-1,1. U malt vyrobených z portlandského cementu byly tyto atomové poměry 3/1-8/01. Nezhydratované částice strusky o vysokém obsahu vápníku, nepatrné množství sodíku, nezhydratované částice popílku a částečně rozpuštěné kuličky popílku byly pozorovány také pomocí SEM analýzy. Vzhledem k tomu, že zvýšený obsah strusky ve směsi vedl k tomu, že pasta z alkalicky aktivovaného popílku a strusky vykazovala kompaktnější strukturu pórů o menším počtu, chemické smrštění pasty připravené z alkalicky aktivovaného popílku a strusky dosahovalo hodnot 0,01-0,022 ml/g. Tyto hodnoty byly nižší, než tomu bylo u past vyrobených z portlandského cementu, které dosahovaly smrštění 0,06-0,10 ml/g. Zatímco autogenní smrštění pasty vyrobené z alkalicky aktivovaného popílku a

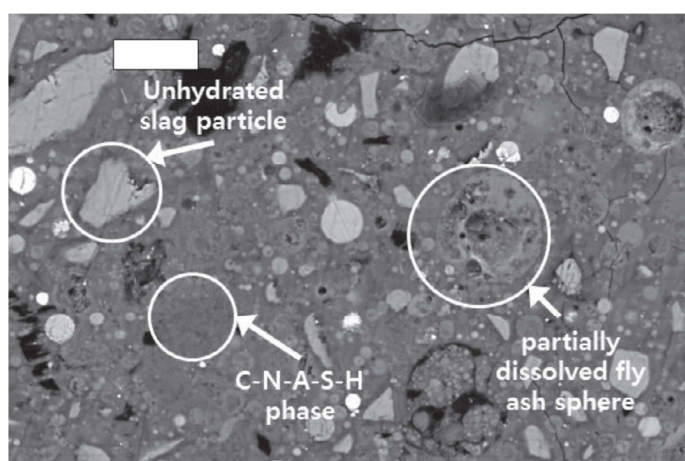
strusky bylo vyšší než u past vyrobených z portlandského cementu. Kromě toho, že pórový objem pasty z alkalicky aktivovaného popílku a strusky byl v rozmezí 60-80%, což souvisí s vlastním vysoušením a výsledným poklesem vlhkosti uvnitř kapilár a pórech, bylo smrštění mnohem vyšší než u pojiv na bázi portlandského cementu, které bylo 36,4 %. Z těchto výsledků vyplývá, že k autogennímu smrštění alkalicky aktivovaného popílku a strusky došlo hlavně kvůli vlastnímu vysoušení ve ztvrdlém stavu než díky objemovým kontrakcím způsobeným chemickým smrštěním v čerstvém stavu malty. Chemické a autogenní smrštění je zapříčiněno zvýšeným obsahem strusky nebo křemičitanem sodným. S nárůstem obsahu strusky nebo křemičitanu sodného se současně snižuje jak celková pórovitost, tak i objem pórů, protože matrice se stává hustší v důsledku tvorby více reakčních produktů. Malty z alkalicky aktivovaného popílku nebo strusky vykazovaly vyšší stupeň smrštění sušením, než je tomu u vzorku portlandského cementu, což mohlo být způsobeno vyšším kapilárním napětím vyplývajícím z vyššího pórovitého objemu malty z alkalicky aktivovaných pojiv, oproti pojivu z portlandského cementu. [20]



Obrázek 2: BSE S10 vzorek po 28 dnech vykazuje přítomnost (a) fáze C-N-A-S-H (tmavě šedá), (b) částečně rozpuštěného popílku oblasti (šedá) a (c) částic nezhydratované strusky (světle šedá). [BSE – režim sekundárních elektronů]. [20]



Obrázek 3: BSE vzorek S20 po 28 dnech vykazuje přítomnost (a) fáze C-N-A-S-H (tmavě šedá), (b) částečně reaguje popílku koule (šedá), a (c) nezhydratované strusky částic (světle šedá). [20]



Obrázek 4: BSE S30 vzorku po 28 dnech vykazuje přítomnost (a) fáze C-N-A-S-H (tmavě šedá), (b) částečně reaguje popílku koule (šedá), a (c) nezhydratované strusky částic (světle šedá). [20]

4 Odolnost správkových malt vůči požáru

Alkalicky aktivovaná pojiva vykazují vysokou stabilitu i při teplotách kolem 1000°C. F.Pacheco-Torgal a kolektiv potvrdili, že alkalicky aktivovaná pojiva mohou být použita jako protipožární materiál, který je schopen odolat vysokým teplotám po dobu 120 minut, což je v souladu s příslušnými normami České republiky. Protipožární materiál musí prokázat, že teplota na obrácené straně, která není vystavena ohni, musí mít teplotu nižší než 120°C. Studie ukazují, že při porovnání pojiv z portlandského cementu a alkalicky aktivovaného pojiva pod standartní křivkou požární zkoušky dochází k odprýskávání povrchových vrstev pouze u cementových kompozitů s pojivem na bázi portlandského cementu. Vnitřní struktura pórů u alkalicky aktivovaných pojiv umožňuje rychlý únik vodní páry, což vede ke snížení tlaku ve vnitřní struktuře pórů. [18]

Během požáru dochází k explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev cementového kompozitu o velikosti zhruba 30-50 mm. Je tak možné, že u cementového kompozitu může dojít ke ztrátě vrstvy po vrstvě (jak je tomu u cibule) v důsledku procesu odlomení hran, jako tomu bylo například v roce 1996, kdy vypukl požár v Channel Tunnel mezi Francií a Anglií. K explozivnímu odlupování dochází v průběhu 15 -30 minut od propuknutí požáru. Byla předložena řada teorií, které se snaží objasnit drolení cementového kompozitu při požáru a které jsou rozděleny do 4 kategorií, jež se snaží o objasnění tohoto jevu: a) vlastní vlhkost cementového kompozitu; b) termo-mechanické teorie; c) tepelné nekompatibility mezi cementem a ostatními složkami v cementové matici; d) fyzikálně-mechanické změny, jako jsou například přeměny křemene. Výzkumníci v této oblasti doposud nedosáhli úplné shody o relativním podílu jednotlivých faktorů a jejich vlivu na explozivní odprýskávání. V tomto článku je zahrnut i pátý faktor: e) vliv kameniva, jeho velikost a řada dalších aspektů, které musíme vzít rovněž v úvahu.

Lze říci, že stejně jako druh, tak i rozměry kameniva hrají významnou roli při odlupování cementového kompozitu při vysokých teplotách. Jestliže je maximální velikost kameninového zrna menší než 10 mm, dochází k explozivnímu odprýskávání bez ohledu na to, zda bylo jako pojivo použito portlandského cementu nebo pojivo na jiné bázi, například na bázi geopolymery. Stejně závěry se týkají i samotné pevnosti cementového kompozitu, která v tomto případě také nehraje velkou roli. Na druhou stranu je explozivnímu

odprýskávání poměrně dobře zabráněno, jestliže je použito kamenivo o maximálním zrně 14 mm. Závislost drolení kameniva lze vysvětlit na velikosti lomové procesní zóny. V návaznosti na tento fakt se snižuje kinetická energie, která může dosáhnout předního lomu kameniva a cementové kompozity tak mají lepší odolnost vůči odlupování povrchových vrstev cementového kompozitu. Při vysokých teplotách se cementový kompozit vyrobený z portlandského cementu dehydratuje a rozloží. To naznačuje, že odlupování je způsobeno fyzikálními faktory. Snížení obsahu vody je spojeno s klesajícím explozivním odprýskáváním, což naznačuje, že celkový tlak v pórech je také jedním z hlavních faktorů, na který musí být kladen důraz. Při testování cementových kompozitů z portlandského cementu v různém stáří bylo sníženo množství odpařené vody z 3,68 % na 2,55 % a vyvolalo to pokles v explozivním odprýskávání o 23 %. Tento pokles byl pouze z poloviny způsoben změnou velikosti zrn kameniva od malých až po střední, což naznačuje dominantní úlohu lomové plochy kameniva při explozivním odprýskávání. [22]

Cementového kompozity na základě portlandského cementu vykazují poměrně slabou odolnost při teplotním zatížení, jestliže zatěžovací teplota přesáhne 300°C. Po překročení teploty 300°C se začínají rozkládat hydratační produkty. Při teplotě 400°C dochází k rozkladu portlanditu. K rozkladu C-S-H gelů dochází při teplotě 600°C. V okolí teploty 700°C dochází k rozkladu uhličitanu vápenatého. Avšak alkalicky aktivovaná pojiva vykazují vysoký stupeň stability i při dosažení teplot kolem 1000°C.

Wei-Chien Wang a kolektiv se zabývají aktivací metakaolinu a břidlicových odpadů. Tyto studie poukazují na dosažení vysokých mechanických vlastností i po tepelném zpracování. Vzorky připravené z těchto materiálů vykazují mírné ztráty pevnosti mezi 600°C a 1000°C a dokonce i mírné zvýšení pevnosti při teplotě 1200°C.

Vzhledem k pevnostem po tepelném zatěžování, alkalicky aktivovaného metakaolinu, bylo nejlepších výsledků dosaženo při poměru Si/Al mezi 1,5-1,7.

Tvrzená struska poměrně rychle tuhne, má dobrou pevnost v tlaku, je odolná vůči chemikáliím, vykazuje nízký stupeň propustnosti a má dobré protipožární vlastnosti. Rychlost ultrazvukového impulzu se zvyšuje spolu s vyšší dávkou alkalicky aktivovaného pojiva. Jestliže se rychlost ultrazvukového impulzu zvyšuje, značí to o kompaktní vnitřní struktuře. Stejný trend je také pozorován při vysoké teplotě, kde ale naopak rychlost ultrazvukového impulzu klesá se zvyšujícím se poměrem kapalina/pevná látka.

Zpracovatelnost malt s alkalicky aktivovanými pojivy může být zvýšena, jestliže se změní vodní součinitel, nebo se upraví dávkování alkalicky aktivního pojiva, které může zkrátit dobu míchání. Pevnost v tlaku alkalicky aktivované struskové pasty se zvyšuje s dobou zrání,

přičemž Wei-Chien Wang uvádí, že s tímto pojivem lze dosáhnout pevnosti v tlaku 79,2 MPa. Se snížením vodního součinitele se lépe vyvíjí pevnost v tlaku při vysoké teplotě. Jestliže zatěžovací teplota přesáhne 500°C, většina krystalové vody se odpaří, velikost pórů se zvyšuje a tím dojde k poklesu pevnosti v tlaku. [23]

4.1 Děje probíhající v ŽB konstrukci vystavené účinkům požáru

Při výskytu požáru v železobetonové konstrukci dochází k postupnému zahřívání této konstrukce. V prvních fázích zahřívání, při teplotě cca 100°C, se postupně uvolňuje kapilární voda. V rozmezí teplot od 80°C do 150°C již dehydratuje ettringit. Při teplotě v rozmezí od 150°C do 170°C se začne postupně rozkládat sádra $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a při dosažení teploty 170°C nastane i počátek dehydratace C-S-H gelu. Většina polymerních vláken se začíná tavit již při teplotě kolem 170°C. Při 200°C se v důsledku ztráty fyzikálně vázané vody zvyšuje vnitřní tlak. Při teplotě 374°C je veškerá volná voda vypařena do okolí. Při dalším teplotním zatěžování se rozkládá portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) a to při teplotě kolem 400°C. Dalším velmi důležitým mezníkem při teplotním zatěžování je teplota 573°C, kdy dochází v kamenivu a písku k modifikaci krystalové fáze z β -křemene na α -křemen. Během této přeměny vznikají vlivem objemových změn trhliny, které vedou ke snížení únosnosti konstrukce. V další fázi se při teplotě 600°C rozkládá C-S-H gel na β - C_2S . Zhruba při teplotě 700°C dochází k silné endotermické reakci, během které je rozkládán uhličitán vápenatý na oxid uhličitý $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Kolem teploty 800°C vzniká keramická vazba. V rozmezí teplot 1100°C až 1200°C nastává tvorba wollastonitu, což je metamorfovaný vápenec β ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{SiO}_2$). U teploty 1300°C již dochází k tavení některých složek cementového kompozitu a jeho úplnému rozkladu.

Rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti, rozdílné schopnosti absorpce tepelné energie jednotlivých složek i teplotní gradient mezi povrchovými a vnitřními vrstvami správkové malty jsou příčinami vzniku pnutí na rozhraní jednotlivých částic či krystalů a následným vznikem mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny a praskliny způsobují nejen okamžité poklesy pevnosti, ale také snižují odolnost vůči působení vody a různých chemicky agresivních látek na bázi vodných roztoků solí. V závislosti na velikosti a hloubce porušení pórovitého systému se mohou tyto látky dostat i k ocelové výztuži, kde mohou způsobit její

korozí. S jakou rychlostí jsou tyto látky schopny narušit strukturu správkové malty nebo ocelové výztuže závisí především na charakteru pórovité struktury, celkovém objemu, distribuci i velikosti pórů. Pórovitá struktura stavebních materiálů na bázi cementových kompozitů je z matematického hlediska jen velmi těžce popsatelná, protože se skládá z nepravidelných pórů nejen co do jejich velikosti a množství, ale i nejrozličnějších tvarů s různorodými charakterystikami povrchu.

Při požáru má z hlediska pohybu kapalin a plynů pozitivní vliv taková struktura pórů, která tvoří navzájem propojené kapiláry umožňující únik vodní páry a tím pádem i snížení tlaku ve struktuře správkové malty. Jestliže by byla pórovitá struktura uzavřená, mohlo by v ní v důsledku překročení tlaku vodní páry dojít k explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev.

Důležitým faktorem při úniku kapalin a plynů z pórovité struktury správkových malt je také skutečnost, že se v těchto pórech nikdy nevyskytuje čistá voda, ale jsou to různé vodné roztoky plynů nebo pevných látek o různé koncentraci, jejichž vlastnosti jsou od čisté vody zcela odlišné.

Pozitivní vliv na požární odolnost správkových malt mají také polymerní vlákna. V dnešní době patří mezi nejpoužívanější polymerní vlákna vlákna polypropylenová, u kterých v případě vzniku požáru dochází k jejich roztavení a následnému vyhoření, přičemž po nich zůstávají dutiny, kterými může unikat vodní pára a nedochází tak k explozivnímu odtržení vrchních vrstev cementového kompozitu. Kdyby při požáru nedošlo ke vzniku těchto prostorů, vodní pára by neměla kam expandovat a mohla by tak způsobit vznik trhlin a explozivní odprýskávání povrchových vrstev cementového kompozitu. [16]

Děje probíhající v oceli během požáru

Při teplotách do 350°C sice dochází k rekrystalizaci mikrostruktury ocelové výztuže, avšak její mechanické vlastnosti se nemění natolik, aby došlo k ohrožení bezpečnosti objektu. Kritickou teplotou pro stavební ocel se považuje teplota kolem 470°C. Jestliže je tato kritická hranice překročena, může dojít k samovolnému přetvoření ocelového prvku a tím pádem i ke ztrátě jeho nosnosti. S rostoucí teplotou klesá jak hodnota pevnosti, tak i tažnosti oceli. Spolu se zvyšující se teplotou oceli rostou její plastické vlastnosti a dochází k tzv. tečení oceli.

Vzájemného spolupůsobení cementového kompozitu a oceli je vhodné nejen z hlediska alkalické pasivace výztuže, ale také z časového hlediska, kdy je ocelová výztuž schopna zachovat svou mechanickou stabilitu a únosnost, protože je díky betonové krycí vrstvě zabráněno přímému ohřevu ocelového prvku. Jedním z negativních vlivů, který může

nastat v průběhu požáru, jsou rozdílné teplotní roztažnosti betonového kompozitu a ocelové výztuže. Vlivem zvýšené teploty tak může dojít k předčasnému vzniku trhlin a ke ztrátě mechanických vlastností železobetonu, zejména pak zhoršení pevnosti v tahu betonu vlivem ztráty spolupůsobení cementového kompozitu a oceli. [16]

4.2 Požární odolnost – Eurokód, Normy

Požární odolnost stavebních konstrukcí je vyjádřena v minutách vzhledem k jejich odolnosti vlivem působení vysokých teplot, které vnikají během požáru, aniž by došlo k narušení jejich funkcí, které jsou specifikovány mezními stavy požární odolnosti. Narušením funkce konstrukce je rozuměna ztráta stability nebo zřícení konstrukce, vytvoření trhlin či otvorů, zapálení hořlavých látek prostupem tepla na druhé straně konstrukce. Požární odolnost stavební konstrukce musí být zachována po celou dobu životnosti stavby a se určuje podle stupně požární bezpečnosti požárního úseku. Udává se v minutách a zároveň se určuje i druh konstrukce (DP1, DP2, DP3) podle použitých hmot (A1, A2, B, C, D, E, F – dle ČSN EN 13 501-1). [47]

Tabulka 1: Požadavky na požární bezpečnost vzhledem k betonu. [48]

Cíl	Požadavek	Použití betonu
1. Omezení rozvoje požáru	Stěny, podlahy a stropy by měly být provedeny z nehořlavého materiálu.	Beton je materiál inertní a nehořlavý (třída reakce na oheň A1).
2. Zachování stability nosných konstrukčních prvků po stanovenou dobu požáru	Prvky by měly být provedeny z nehořlavého materiálu a měly by mít vysokou požární odolnost.	Beton je nehořlavý a díky své nízké tepelné vodivosti si při běžných požárech zachovává většinu své pevnosti.
3. Omezení rozvoje a šíření požáru a kouře	Požární dělicí stěny a stropy by měly být nehořlavé a měly by mít vysokou požární odolnost.	Kromě výše uvedeného sníží vhodně navržené betonové spoje možnost porušení požárem a tak plně využívají konstrukční kontinuitu betonu.
4. Napomáhání při evakuaci obyvatel a zajištění bezpečnosti záchranných jednotek	Únikové cesty by měly být provedeny z nehořlavého materiálu a měly by mít vysokou požární odolnost, aby mohly být bezpečně využity delší dobu.	Betonová jádra jsou velice masivní a mohou poskytovat velmi vysokou požární odolnost. Obzvláště účinnou metodou výstavby je posuvně či šplhající bednění.
5. Uspádnění zásahu požárními jednotkami	Nosné prvky by měly mít vysokou požární odolnost pro zajištění účinného zásahu požárními jednotkami. Neměly by z nich odpadávat hořící části (kapky).	Nosné prvky si zachovávají svou celistvost po dlouhou dobu. Z betonu neodpadávají rozžhavené části.

Eurokód 2

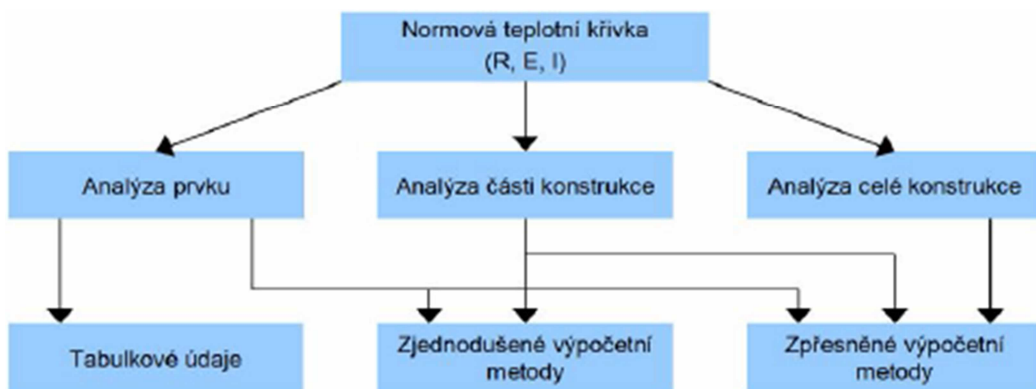
Konstrukce navržené podle Eurokódu 2 musí splňovat kritéria požární ochrany R, E a I, které se používají ve spojení s číslovkou vyjadřující normovou požární odolnost (vztaženou k normovému požáru ISO 834) v minutách, kde (R) je únosnost, (C) celistvost a (I) představuje izolační schopnost.

Tabulka 2: Tři hlavní kritéria požární ochrany podle Eurokódu 2, části 1-2. [48]

Označení	Mezní stav při požáru	Kritérium
Résistance (R) <i>Anglicky:</i> Fire resistance, Load-bearing capacity	Mez únosnosti Konstrukce by si měla zachovat únosnost.	Únosnost konstrukce musí být zaručena po předepsanou dobu požáru. <i>Doba, po kterou je zachována nosná funkce prvku při požáru, definovaná jeho mechanickou únosností.</i>
Etanchéité (E) <i>Anglicky:</i> Frame arresting, Separation, Tightness	Mez celistvosti Konstrukce by měla ochránit lidi a zboží před plameny, škodlivým kouřem a žhavými plyny.	Dostatečná celistvost předchází proniknutí plamenů a žhavých plynů na odvrácenou stranu. <i>Doba, po kterou je kromě únosnosti zachována požární dělící funkce prvku, definovaná těsností jeho spojů pro plameny a plyny.</i>
Isolation (I) <i>Anglicky:</i> Fire shielding, Heat screening, Separation	Mez izolace Konstrukce by měla ochránit lidi a zboží před žářem.	Dostatečná izolace vede k omezení nárůstu teploty na odvrácené straně. <i>Doba, po kterou je kromě únosnosti a celistvosti zachována požární izolační schopnost prvku, definovaná dodržáním přípustného nárůstu teploty na straně nevystavené požáru.</i>
Výše uvedené mezní stavy se vyjadřují v minutách – v následujících intervalech: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360.		

Tato norma se zaměřuje na všeobecnou požární bezpečnost, na vznik mimořádné situace vystavení požáru i aspekty pasivní požární ochrany. Vzhledem k tomuto faktu lze navrhovat konstrukce a posuzovat jejich požární odolnost výběrem jedné ze tří metod:

1. Určení minimálních hodnot rozměrů průřezu a osově vzdálenosti výztuže od líce betonu podle tabulek.
2. Návrh průřezu prvku pomocí zjednodušených metod pro určení redukovaného průřezu jako funkce normové teplotní křivky (ISO 834).
3. Návrh pomocí zpřesněných výpočetních metod jako funkce teplotního zatížení a chování prvku vystaveného požáru. [48]



Obrázek 5: Postup návrhu požární odolnosti konstrukcí. [48]

Požárně odolné sanační malty

Odolnost cementových malt modifikovaných polymery (PCC) vzhledem k požáru byla prokázána podle standardní teplotní křivky požáru pro pozemní stavby, stejně tak i pro teplotní křivky v tunelech podle německé směrnice ZTV-ING a směrnic německého Železničního spolkového úřadu (EBA). [49]

Stavební výrobky, v tomto případě správkové malty s odolností vůči vysokým teplotám, musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Sanační malty s požární odolností, jakožto výrobky třídy A1, by neměly přispívat k požáru v žádném z jeho stádií. Základní třídy hořlavosti jsou zatříděny do pěti stupňů: [33]

Stupeň A: nehořlavé stavební hmoty

Stupeň B: nesnadno hořlavé stavební hmoty

Stupeň C: těžce hořlavé stavební hmoty

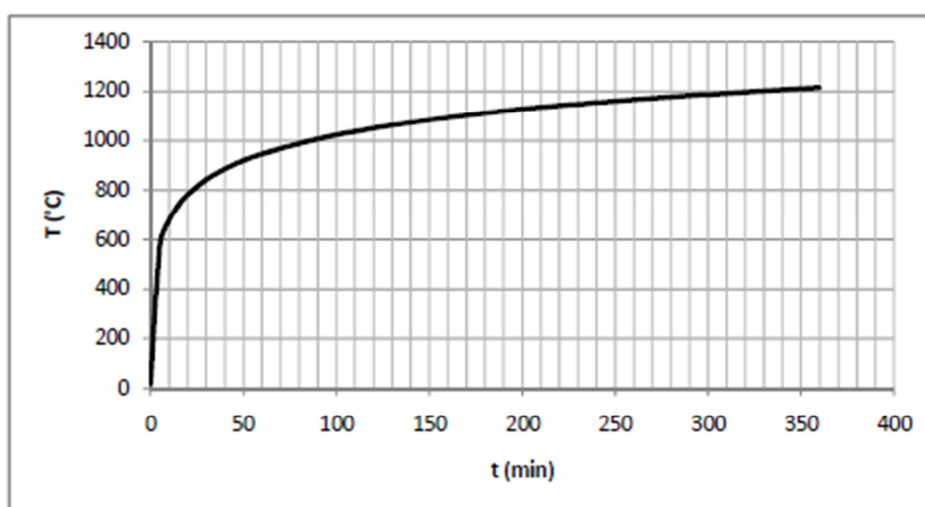
Stupeň C2: středně hořlavé stavební hmoty

Stupeň C3: lehce hořlavé stavební hmoty

Zkoušky požární odolnosti jsou specifikovány v normě ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky

V normě je popsán postup zkoušení vzorků a průběh zatěžovací teploty, který je sledován vztahem:

$$T = 345 \cdot \log_{10} \cdot (8 \cdot t + 1) + 20$$



Obrázek 6: Normová teplotní křivka. [32]

Označování požární odolnosti stavebních konstrukcí

R(t)...označení splnění mezního stavu únosnosti nebo stability konstrukce

E(t)...označení splnění mezního stavu ztráty celistvosti stavební konstrukce

I(t)...označení splnění mezního stavu limitních teplot na neohřívaném povrchu konstrukce

W(t)...označení splnění mezního stavu limitní hodnoty hustoty tepelného toku ve stanoveném místě

S(t)...označení splnění mezního stavu kouřotěsnosti

t...udává dobu v minutách

Požární bezpečnost stavebního objektu je poté charakterizována stupněm požární bezpečnosti jednotlivých požárních úseků, na které je stavební objekt rozdělen. Stupeň požární bezpečnosti je označován římskými číslicemi od I (nejnižší) do VII (nejnáročnější) a jeho stanovení je závislé na [17]:

- požárním riziku, tj. výpočtovém požárním zatížení
- hořlavosti hmot použitých na důležité konstrukce
- výšce objektu

Stupeň požární bezpečnosti vychází z předpokladu, že 1 kg/m^2 výpočtového požárního zatížení splňuje požadavek 1 minuty požární odolnosti konstrukce. [17]

Tabulka 3: Stupně požární bezpečnosti. [17]

Stupeň požární bezpečnosti	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.
Odolnost stavebních konstrukcí v minutách Požární třídy odolnosti podle DIN 4102	15	30 F30	45	60 F45	90 F90	120 F120	180 F180

Některé prostory a požární úseky lze prohlásit za úseky bez požárního rizika, pokud je splněna podmínka: $a < 1,1$ a $\rho_v < 7,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ nebo $a \geq 1,1$ a $\rho_v < 3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Požární bezpečností stavebního objektu rozumíme jeho schopnost bránit ztrátám na zdraví a životech osob i zvířat během požáru. Normový průběh požáru v prostoru stavebního objektu předpokládá, že teploty plynů T_N [°C], dosáhnou:

$$T_N = T_0 + 345 \cdot \log \cdot (8 \cdot t + 1)$$

t...doba trvání požáru [min]

T_0 ...počáteční teplota plynů před požárem [°C]. [17]

5 Odolnost správkových malt vůči chemicky agresivnímu prostředí

Cementové kompozity na bázi portlandského cementu mají nižší propustnost, která znemožňuje vodě a dalším agresivním médiím vstoupit do cementové matrice a způsobit tak korozi. Jednou z hlavních výhod alkalicky aktivovaných pojiv oproti portlandskému cementu je chemická odolnost. Při použití malty s alkalicky aktivovanou struskou bylo dokázáno zvýšení pevnosti v tahu, a to i po ponoření do roztoku kyseliny chlorovodíkové ($\text{pH} = 3$). Další výzkum byl zaměřen na zkoumání expozice alkalicky aktivované strusky při šestiměsíčním uložení v 5% koncentraci roztoku kyseliny. Při uložení v kyselině citronové byly mechanické změny nízké, pro kyselinu dusičnou a chlorovodíkovou mírné, avšak pro kyselinu sírovou byly nejhorší. Cementové kompozity na bázi portlandského cementu zaznamenaly ztrátu hmotnosti mezi 78 – 95 %.

Další výzkum se zabýval porovnáváním odolnosti několika pojiv vůči kyselinám. Alkalicky aktivovanou struskou vybraná pojiva byla z alkalicky aktivované strusky, portlandského cementu, popílek/vápenného pojiva a oxidu hlinitého s cementem. Tato pojiva byla vystavena agresivnímu prostředí kyseliny dusičné ($\text{pH} = 3$) a kyseliny octové o hodnotách $\text{pH} = 3$ a 5. Pojiva na bázi portlandského cementu zaznamenaly větší ztráty hmotnosti než ostatní pojiva, s výjimkou pojiva oxidu hlinitého a cementu. Podle F. Pacheco-Torgal je chemická odolnost závislá spíše na povaze hydratačních produktů, než na pórovitosti. Uvádějí také, že nízké hodnoty pH kyselin způsobují intenzivnější chemický útok. Dále se studie zabývala porovnáním pojiva na bázi PC a cementového kompozitu aktivovaného struskou, NaOH a vodního skla při ponoření do kyseliny octové ($\text{pH} = 4$) v průběhu jednoho roku. Betony na bázi PC zaznamenaly vyšší ztrátu pevnosti o 47 %. Betony aktivované struskou, NaOH a vodním sklem měly naopak ztrátu síly jen 33 %. F. Pacheco-Torgal a kolektiv tvrdí, že ztráta síly může být ovlivněna obsahem vápníku, a to 64 % pro PC betony a jen z 39 % pro betony z alkalicky aktivované strusky. Sloučeniny strusky mají nižší Ca/Si molární poměr a jsou tak více stabilní v kyselém prostředí. Naopak sloučeniny vápníku v PC betonech mají vysoký molární poměr Ca/Si a reagují s kyselinou octovou za vzniku velmi rozpustných sloučenin vápníku. Došli k závěru, že betony s nižším obsahem volného CaO mají v kyselém prostředí vyšší odolnost.

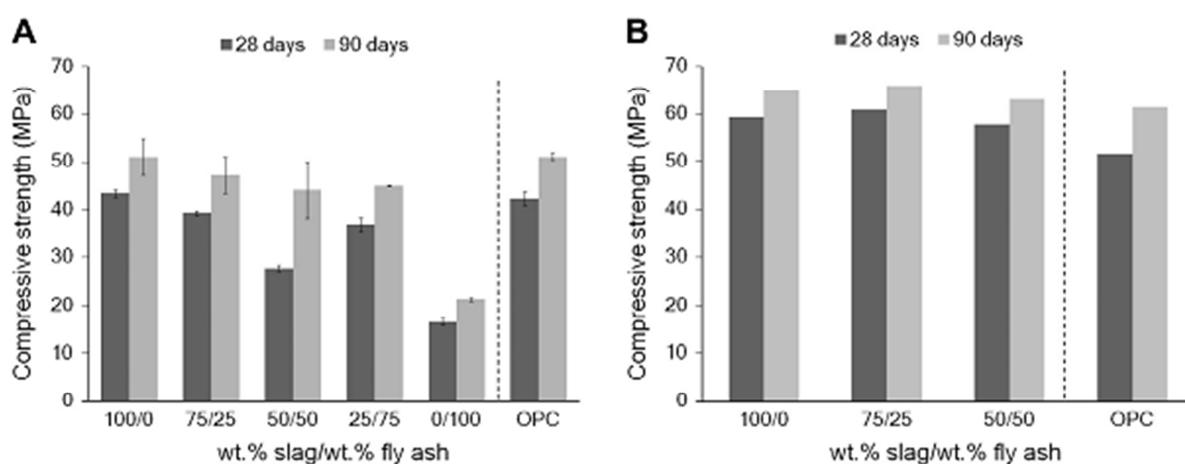
F.Pacheco-Torgal také potvrzuje, že cementové kompozity připravené z alkalicky aktivovaných popílků mají vyšší chemickou odolnost při ponoření do roztoku kyseliny sírové o koncentraci 10 %. Po uplynutí 8 týdnů byla zaznamenána 3 % ztráta hmotnosti a 35 % ztráta síly.

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování je u alkalicky aktivovaného popílku vyšší, než u cementového kompozitu vyrobeného z portlandského cementu o stejné pevnosti v tlaku. Cementový kompozit z alkalicky aktivovaného popílku odolává 2,2 krát vyššímu počtu cyklů, než je tomu u cementového kompozitu připraveného z portlandského cementu. F.Pacheco-Torgal na toto téma poukazuje pouze na 30% ztrátu pevnosti v tlaku u alkalicky aktivovaného popílku při zatěžování 150 zmrazovacími cykly. F.Pacheco-Torgal analyzoval odpor vůči zmrazovacím cyklům u alkalicky aktivované strusky po 100 cyklech. Došel k závěru, že tato pojiva vykazují po těchto zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech vysokou pevnost v tlaku. [18]

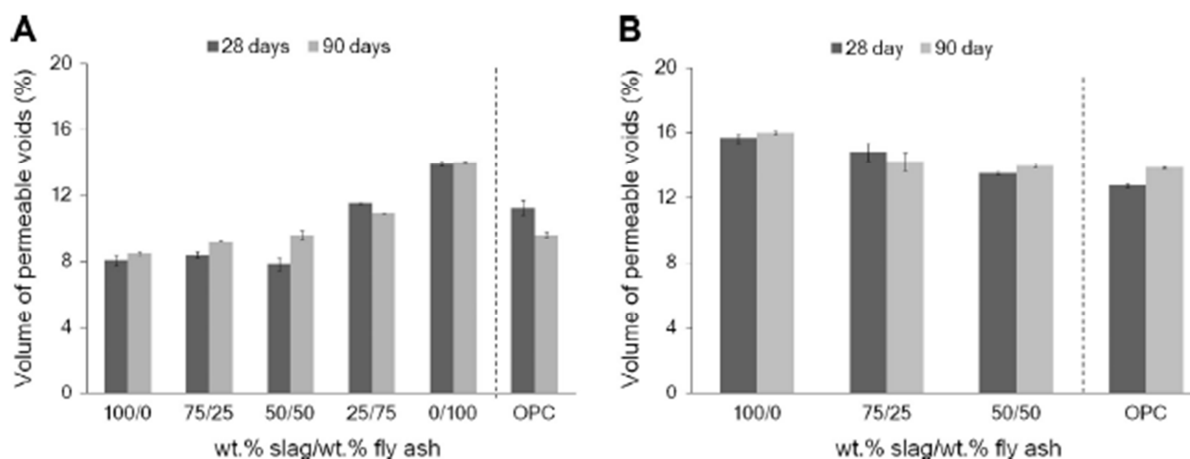
Pojiva vykazují vyšší chemickou odolnost v závislosti na nízkém obsahu rozpustných vápenatých sloučenin spíše než na jejich nízké propustnosti. Na druhé straně využití vápníku snižuje odpor vůči kyselinám, ale zvyšuje šance na výskyt alkalicko-křemičitanové reakce. I když tato pojiva obsahují vysokou úroveň alkalických prvků, nezdá se, že by byla spojována s výskytem alkalicko-křemičitanové reakce. Může to být zapříčiněno tím, že většina alkalických prvků je spojena s druhotnými reakčními produkty. Vápník v alkalicky aktivovaných pojivech je nezbytný pro udržení vysoké hodnoty pH, ale současně může být zodpovědný za spouštění alkalicko-křemičité reakce. Na rozdíl od pojiv na bázi portlandského cementu vykazují alkalicky aktivovaná pojiva vysokou stabilitu při vystavení účinkům vysokých teplot, které závisí na Si/Al poměru. Při zkoumání reakce alkalicky aktivovaných pojiv na oheň se ukazuje, že tyto materiály jsou vhodné pro práce s hrozícím rizikem vzniku požáru, jako jsou výškové budovy a tunely. Alkalicky aktivovaná pojiva jsou však poměrně náchylná k tvorbě výkvětů. Tento nedostatek lze ale výrazně snížit použitím hydrotermálních procedur nebo hlinito-vápenaté příměsi. I když hydrotermální vytvrzování má omezené využití při výstavbě v in-situ. [18]

Kinetika degradace železobetonových konstrukce je závislá jak na reaktivitě agresivních látek s reakčními produkty v pojivu, tak na jejich vodivosti v rámci cementové matrice. Trvanlivost vyztuženého cementového kompozitu lze poměrně dobře sledovat a posuzovat vzhledem k jeho odolnosti vůči chloridovým iontům. Chloridy mohou k výztuži proniknout kapilární absorbcí, hydrostatickým tlakem nebo difuzí iontů. Chloridové ionty obvykle nepředstavují příliš velké riziko pro samotnou matici, ale jejich obsah je hrozbou

v případě, že se dostanou k ocelové výztuži. Dostanou-li se chloridové ionty až k ocelové výztuži, mohou podporovat její korozi, což vede k depasivaci a následnému snížení únosnosti cementového kompozitu, v určitých případech i k následnému zřícení konstrukce. Alkalicky aktivovaná pojiva mohou být syntetizována smícháním alkalického roztoku s reaktivním aluminosilikátovým práškem jako je metakaolin, popílek nebo struska. Bylo prokázáno, že tato pojiva jsou vhodnou alternativou pro použití ve výrobě cementových kompozitů. Tato pojiva ukazují srovnatelnou trvanlivost i mechanické vlastnosti jako mají klasické betony vyrobené z portlandského cementu. Idawati Ismail a kolektiv prokázaly, že při porovnání tmelů vyrobených z portlandského cementu s alkalicky aktivovanými materiály syntetizovanými ze strusky, popílku nebo prekursorů metakaolinu, vykazují alkalicky aktivované materiály nižší propustnost pro chloridové ionty. Lze tedy říci, že alkalicky aktivované strusky a popílky mění propustnost cementového kompozitu či malt a tedy i šíření agresivních látek, jako jsou chloridy. Chemismus a transportní mechanismy chloridových iontů jsou v těchto pojivech ovlivněny dominantní alkalickou reakcí. Reakční produkty, zejména pak C-A-S-H a N-A-S-H vazebných gelů řídí transportní mechanismy. Testy ukazují, že pokračující mikrostrukturální reakce alkalicky aktivovaných pojiv zpomaluje pronikání chloridů. Tato studie poukazuje na fakt, že lepší odolnosti vůči chloridovým iontům dochází v prostředí alkalicky aktivované strusky, kde dominují vazby C-S-H gelu. [19]



Graf 1: Pevnost v tlaku malt (A) a betonů (B) na bázi alkalicky aktivované strusky / popílek směsi, v závislosti na době vytvrzování (28, 90denní). Jsou také zobrazeny Silné OPC na bázi referenční malty a betonu. [osa x- procentuální zastoupení slag = strusky, fly ash = popílku; osa y – pevnost v tlaku]. [19]



Graf 2: Průměrný objem propustných dutin z malt (A) a betonů (B) na bázi alkalicky aktivované strusky / popílku směsi, a OPC, jako funkce doby vytvrzování (28, 90denní). [osa x- procentuální zastoupení slag = strusky, fly ash = popílku; osa y – objem propustných pórů]. [19]

Koroze ocelové výztuže

Koroze ocelové výztuže je jedním z faktorů ovlivňujících strukturální schopnost betonových prvků. Schopnost účinně se bránit je zejména ovlivněna polohou ocelové výztuže v dané konstrukci. Při použití pojiva na bázi portlandského cementu je ocelová výztuž před chemicky agresivním prostředím chráněna díky pasivitě krycí vrstvy betonu, která je zapříčiněna vysokou alkalitou $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Koroze ocelové výztuže může nastat, dojde-li k poklesu hodnoty pH a tudíž i poklesu alkalické pasivity. Tyto jevy mohou být způsobeny jednak karbonatací oxidem uhličitým nebo průnikem chloridových iontů do struktury cementového kompozitu. Koroze oceli může nastat také vlivem elektrochemické reakce. Tento proces spočívá v anodickém rozpouštění železa, kdy pozitivně nabití ionty železa přecházejí do roztoku a přebytek negativně nabitých elektronů je veden k oceli přes katodu, kde jsou elektrony absorbovány za vzniku hydroxilových iontů. Jejich spolupůsobením s ionty železa vede ke vzniku $\text{Fe}(\text{OH})_2$, který má korozivní účinky. Nárůst objemu je spojený s tvorbou korozních produktů, které zaujímají větší objem, než byl jejich původní a dochází tak ke vzniku trhlin a odlupávání krycí vrstvy betonu. Některé studie o šíření chloridových iontů ukazují, že alkalicky aktivovaná pojiva jsou schopna zabránit vniknutí škodlivých prvků, které by mohly zapříčinit korozi ocelové výztuže.

F.Pacheco-Torgal potvrzuje, že směsi vyrobené z alkalicky aktivovaného popílku vykazují podobnou odolnost vůči korozi oceli jako pojiva z portlandského cementu. Ovšem některé studie poukazují také na fakt, že alkalicky aktivované popílků mají lepší odolnost proti

snížení hodnoty pH, než je tomu u pojiv z portlandského cementu. Zmiňují se o snížení hodnoty pH, která je spojena s vývojem hydratační reakce, ale alkalická pasivita zůstala i po 5 letech bez vzniku karbonatace výztuže. Oproti tomu pojiva na bázi alkalicky aktivované strusky vykazují nízkou odolnost vůči oxidu uhličitému a karbonatační produkty na ocelové výztuži tak mohou u těchto pojiv vznikat poměrně snadno. Další studie hovoří o tom, že aktivace granulované vysokopecní strusky pomocí metakaolinu mají nízký odpor sycení vůči oxidu uhličitému. [18]

6 Děje probíhající v ŽB konstrukci vystavené účinkům chemicky agresivních látek

Podle charakteru jejich působení vlivy na trvanlivost cementového kompozitu rozdělujeme [7]:

- chemické (kapalné, plynné prostředí)
- biologické (makroskopické a mikroskopické)
- fyzikální (změny teploty a vlhkosti)
- mechanické (dynamické, či statické namáhání)

Rozdělení druhů agresivního prostředí [7]:

- plynné prostředí
- kapalné prostředí
- tuhé prostředí
- biologické vlivy
- bludné vlivy

6.1 Chemická koroze cementového kompozitu

Jedním ze základních rozdělení chemicky agresivního prostředí by mohlo být podle jeho skupenství, zda se jedná o skupenství plynné, kapalné nebo pevné. Při vystavení cementových kompozitů vnějším vlivům dojde působením chemicky agresivních látek k postupnému vymývání cementového kamene, jakožto nejslabšího článku v cementovém kompozitu. V mikrostruktuře cementového kompozitu může také dojít ke vzniku značně objemných krystalických novotvarů, které pak svými expanzními tlaky naruší strukturu cementového kompozitu a zapříčiní jeho degradaci. Vzhledem k životnosti železobetonových konstrukcí je nutno říci, že v průběhu těchto negativních procesů klesá hodnota pH cementového kompozitu a dochází tak ke snižování schopnosti cementového kompozitu dostatečně pasivovat ocelovou výztuž vůči korozi. [7]

6.1.1 Degradace cementových kompozitů vlivem působení agresivního plynného prostředí – atmosférická koroze:

Druhy agresivních plynů a par v atmosféře:

- oxid uhličitý (CO_2)
- oxid siřičitý (SO_2), oxid sírový (SO_3)
- sulfan (H_2S)
- oxidy dusíku (N_xO_y)
- ostatní (HCl , HF , NH_3)

V atmosféře je obsaženo značné množství plynných exhalací, které působí korozivně na betonové konstrukce, jestliže jsou s těmito exhalacemi v kontaktu. Velmi důležitým faktorem u uvedených plynů obsažených v atmosféře je jejich koncentrace a tedy i míra jejich agresivity vzhledem k cementového kompozitu. Koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře je cca 60 mg CO_2 na 1 m³ vzduchu. Koncentrace oxidu siřičitého SO_2 v přírodním prostředí nepřesahuje 0,01 mg SO_2 v 1 m³ vzduchu. V zimních měsících koncentrace SO_2 vzrůstá a to především ve větších městech. Nejvyšší přípustná koncentrace oxidu siřičitého je 0,15 mg SO_2 a nárazově až 0,5 mg SO_2 na 1 m³ vzduchu. V České republice má obsah oxidu siřičitého v atmosféře sestupnou tendenci a to vlivem nedávného odsíření energetických

zdrojů. Tyto plynné škodlivé emise vznikají např. při spalovacích procesech v elektrárnách. [7]

6.1.1.1 Koroze cementového kompozitu vlivem CO₂ – karbonatace cementového kompozitu

Působení atmosférického oxidu uhličitého (CO₂), jeho možné pronikání do betonové konstrukce a účinky na strukturu jsou ovlivňovány druhem hydratačních produktů pojiv, pórovitě kapilární strukturou cementového tmele, ale také povrchovými úpravami. Oxid uhličitý je jedním z činitelů, který může zásadně omezit trvanlivost betonových konstrukcí.

Karbonataci lze definovat jako proces, při kterém oxid uhličitý způsobuje s cementovým tmelem neutralizační reakci, jejímž produktem jsou karbonáty. Průběh této reakce lze indikovat změnou hodnoty pH mezizrnečného roztoku, avšak dlouhodobou hydratací hrubších zrn cementového slínku je způsobeno, že dochází k tvorbě hydroxilových iontů a tím se hodnota pH v mezizrnečném roztoku dále zvyšuje. Vznikající CaCO₃ se usazuje v pórech a kapilárách a postupně je zaplňuje, což zároveň částečně zamezí dalšímu přísunu CO₂, resp. iontů, které by tak mohly vytvářet korozní novotvary. Takto zaplněné póry a kapiláry v povrchových vrstvách zapříčiní změny v mikrostruktuře cementového kompozitu, způsobí zvýšení objemové hmotnosti, ale zároveň dojde k poklesu propustnosti. Ten má naopak kladný efekt vzhledem k ochraně ocelové výztuže v cementového kompozitu.

Vlastní karbonatace a rychlost jejího průběhu je závislá jednak na přítomnosti a koncentraci CO₂, relativní vlhkosti vzduchu, vlhkosti cementového kompozitu (úplně vysušený beton s CO₂ nereaguje), ale také na přítomnosti a rozložení pórů spolu s kapiláry ve struktuře cementového kompozitu. [7]

Průběh karbonatace:

Celý průběh karbonatace lze rozdělit do čtyř etap. V první etapě se přeměňuje Ca(OH)₂, popř. jeho roztok, v mezizrnečném prostoru na nerozpustný CaCO₃, který tak částečně zaplní póry a kapiláry. Ve druhé etapě dochází vlivem přeměny ostatních hydratačních produktů cementu (C_xAH_y, C_xSH_y) ke vzniku modifikací CaCO₃ společně s amorfním gelem kyseliny křemičité. Vlastnosti cementového kompozitu jsou v této fázi karbonatace téměř bez změny. Během třetí etapy dochází k překrystalizování dříve vzniklých uhličitánových novotvarů z mezizrnečného roztoku. Vznik velmi rozměrných i velmi početných krystalů kalcitu a aragonitu zapříčiní zhoršení mechanických vlastností

cementového kompozitu. Ve čtvrté etapě již prostupují celou strukturou cementového tmelu hrubé krystaly kalcitu a aragonitu a stupeň karbonatace je tak téměř stoprocentní. Následkem je ztráta mechanických vlastností, jako je soudržnost a pevnost, které spolu s velmi nízkou hodnotou pH umožní průběh koroze výztuže. Vliv působení oxidu uhličitého musí být sledován u železobetonových konstrukcí, kde vlivem poklesu hodnoty pH dojde k omezení pasivace ocelové výztuže a tím pádem i k její korozi. Objemově rozměrnější oxidy železa mají za následek porušení krycí vrstvy, čímž je agresivnímu prostředí umožněn snazší přístup hlouběji do struktury cementového kompozitu a rychlost koroze tak může být urychlena. [7]

Poznámka:

1) stupeň karbonatace °K [%] se určí výpočtem z obsahu CaO a SO₃, nalezených chemickým rozbořem podle ČSN 72 0113 a ČSN 72 0117 a z obsahu CO₂, vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný CaCO₃

2) stupeň modifikační přeměny °MP se určí výpočtem z obsahu CO₂ vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný CaCO₃ [7]

6.1.1.2 Koroze cementového kompozitu oxidem siřičitým – sulfatace cementového kompozitu

V průběhu sulfatace dochází k postupné přeměně struktury cementového kompozitu. Rychlost sulfatace spolu s kvantitativním a kvalitativním zastoupením meziproductů sulfatace jsou závislé na relativní vlhkosti prostředí, vlhkosti cementového kompozitu a samozřejmě také na přítomnosti a koncentraci SO₂. Působením SO₂ dochází až k úplnému rozkladu struktury cementového kompozitu. Primárně vznikajícím produktem koroze je hemihydrát síranu vápenatého (CaSO₄ · 1/2H₂O), který v průběhu delšího působení oxiduje na sádrovec (CaSO₄·2H₂O). Meziproductem sulfatace je hemihydrát siřičitanu vápenatého (CaSO₃·1/2H₂O). Jako další produkty koroze jsou hemihydrát a dihydrát síranu vápenatého. Množství a tvary krystalů konečného produktu sádrovce jsou značně ovlivněny vlhkostí, což se projevuje i na klesající hodnotě pH, která klesá až na hodnotu 5,4. Při vyšších vlhkostech dochází častěji ke vzniku sádrovce, naopak při nižších vzniká hemihydrát siřičitanu vápenatého (CaSO₃·1/2H₂O). Vysoká koncentrace SO₂ podporuje vznik sulfátů vápenatých. Avšak pro vznik dihydrátu či hemihydrátu je zapotřebí určité vlhkosti, která tak má pro jejich vznik a následnou tvorbu rozhodující vliv. [7]

Průběh sulfatace:

Průběh sulfatace lze rozdělit do čtyř etap, které se v určitém smyslu shodují s průběhem karbonatace. V první etapě sulfatace dojde vlivem přeměny roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mezizrnném prostoru na $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (hemihydrát siřičitanu vápenatého) k zaplnění pórů, čímž se zvyšuje jak hutnost cementového kompozitu, tak i jeho pevnost. Hodnota pH klesá. Ve druhé etapě probíhají přeměny hydratačních produktů cementu s nově vzniklými novotvary, které postupně zaplňují póry cementového kompozitu. V průběhu třetí etapy dojde k překrystalizování primárně vzniklého $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, respektive CaSO_4 na objemově rozměrné krystaly $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (dihydrát síranu vápenatého). Nastane určité období kdy takto vzniklý sádrovec zcela zaplní póry a tím pádem bude dosaženo i nejvyšších pevností, avšak ještě na konci této etapy dochází k jejich prudkému poklesu. Čtvrtá etapa je podmíněna tvorbou trhlinek ve struktuře cementového tmelu, které souvisí i se ztrátou soudržnosti. V této fázi již prorůstají strukturou cementového tmelu hrubé krystaly sádrovce. Je-li daná konstrukce vystavena střídavým účinkům zvlhčování, lze zaznamenat i pátou etapu, která je charakteristická viditelným rozpadem cementového kompozitu v důsledku vzniku (ettringitu), resp. monosulfátu vápenatého. [7]

6.1.1.3 Synergická koroze směsí plynů CO_2 a SO_2

Při reálném vystavení konstrukce atmosférickým vlivům dochází na betonové konstrukci k synergickému spolupůsobení směsí plynů CO_2 a SO_2 . V takto zatěžované betonové konstrukci dojde nejprve k rozkladu kalcitu, který je jedním z hlavních produktů karbonatace. Napadení struktury cementového kompozitu oxidem siřičitým probíhá až po určitém stádiu procesu karbonatace a to směrem od povrchu do středu cementového kompozitu, přičemž se výrazně mění fyzikálně-mechanické vlastnosti cementového kompozitu. V povrchových vrstvách dochází vlivem siřičitanové koroze k přeměně základního materiálu na sulfáty, přičemž jsou zároveň napadány produkty karbonatace a jsou tak karbonáty přeměňovány na sulfáty, které jsou objemně větší a dojde tak k dokonalejšímu utěsnění pórů. Synergické působení urychlí degradaci výchozího materiálu, ale také se výrazně podílí na snižování hodnoty pH. Rychlost, s jakou jsou cementové kompozity napadeny synergickým spolupůsobením, je ovlivněna koncentrací jednotlivých korozních plynů. [7]

6.1.2 Degradace cementových kompozitů vlivem působení agresivního kapalného prostředí

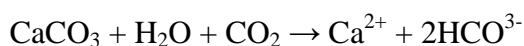
Kapalnému agresivnímu prostředí mohou být vystaveny jak exteriérové konstrukce, které slouží jako nádrže (čističky odpadních vod, bazény) tak i základové konstrukce, které jsou v přímém styku s půdním prostředím. Korozním médiem různého původu a složení mohou být agresivní vody, organické sloučeniny, minerální tuky i oleje. Odolnost cementového kompozitu vzhledem k působení kapalného prostředí je ovlivněna několika faktory. Degradace cementového kompozitu je ovlivněna tím, zda je daná konstrukce vystavena pouze vlivu jednoho agresivního činitele nebo zda se jedná o vliv synergického působení. Dalšími neméně důležitými faktory jsou teplota prostředí a vlastní charakter kapalného prostředí, který lze rozdělit do dvou skupin. Zaprvé podle toho, zda se jedná o vodu stojatou či tekoucí a zadruhé podle toho, zda daná kapalina vyvoluje jednostranný či všestranný tlak. [7]

Degradace cementového kompozitu kapalným prostředím může probíhat třemi způsoby:

- kapaliny (vody) způsobující korozi I. typu
- kapaliny způsobující korozi II. typu
- kapaliny způsobující korozi III. typu

6.1.2.1 Kapaliny způsobující korozi I. typu

Vody s malou přechodnou i trvalou tvrdostí vody (měkké vody) způsobují korozi I. typu. Přechodná tvrdost vody je způsobena kyselým uhličitánem vápenatým a hořečnatým. Rozpustnost těchto uhličitánů je ovlivněna množstvím oxidu uhličitého. Při zvýšeném obsahu CO_2 ve vodě dojde k přechodu CaCO_3 do roztoku dle rovnice:



Tyto „hladové“ vody rychle vyluhují Ca(OH)_2 obsažený ve struktuře cementového kompozitu. Stále přitom probíhá rozklad hydratovaných křemičitanů a hlinitanů. Vyluhování Ca(OH)_2 způsobuje pokles hodnoty pH, což může vyvolat negativní reakci na stabilitu některých hydratovaných slínkových minerálů. Průběh degradace cementového kompozitu je opět závislý na vlivu okolních podmínek, které jsou dány kinetickým stavem vody. [3]

6.1.2.2 Kapaliny způsobující korozi II. typu

Tato koroze je způsobena kapalinami, které s cementovým tmelem vytvářejí rozpustné sloučeniny a ty obalují jádro cementového kompozitu nebo se pozvolna uvolňují z vody. Korozi II. typu způsobují roztoky obsahující ionty SO_4^{-2} , Cl^- , Mg^{+2} , $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{NH}_4)^+$, ale i přírodní vody obsahující $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nebo $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. [3]

6.1.2.3 Kapaliny způsobující korozi III. typu

Vody, které obsahují sloučeniny síranů a chloridů reagují s cementovým tmelem za vzniku látek se zvětšeným objemem. Zprvu se tato reakce projeví zvýšením pevnosti cementového kompozitu vlivem zvýšení jeho hutnosti. Při dalším zatěžování už dochází k zvětšování objemu reakčních zplodin, které tak způsobují narušení struktury cementového kompozitu. Tyto agresivní vody rozdělujeme do dvou kategorií:

- slabě agresivní (≥ 300 mg solí/litr, $\text{pH} \leq 6$)
- velmi agresivní (≥ 1000 mg solí/litr, $\text{pH} \leq 5$) [3]

6.1.3 Degradace cementových kompozitů vlivem působení koroze tuhými látkami

Tuhé látky mohou ve vlhkém prostředí způsobit korozi s určitou podobností ke korozi kapalinami. Jsou-li tyto látky hygroskopické a přijímají tak vlhkost z okolního vzduchu, vede to ke vzniku chemických sloučenin, které mohou v závislosti na koncentraci a teplotě vyvolat značné korozní tlaky. [3]

6.2 Biologická koroze cementového kompozitu

Pro vznik této koroze vlivem napadání povrchu cementového kompozitu různými organismy. Jsou to např. sirné, nitrifikační a železité bakterie, které se podílejí na degradaci cementového kompozitu. Přítomností bakterií ve stojatých vodách nebo půdách se přeměňuje v nich obsažená síra na sulfan (H_2S), který v přítomnosti kyslíku oxiduje na agresivní kyselinu sírovou. Naopak nastane-li situace, kdy nedochází k přístupu vzduchu, odebírají anaerobní mikroorganismy kyslík, který je obsažen ze síranů ve vodě rozpuštěných. Takto může být redukována nebezpečná kyselina sírová na relativně neškodný sulfan.

V prostředí, kde je nadměrný výskyt amoniaku (chlévy), jsou přítomny nitrifikační bakterie, které oxidují amoniak na kyselinu dusičnou. Ta je schopna vyluhovat cementový tmel. Povrchové vrstvy přitom mohou být narušeny pouze estetickými defekty nebo na nich mohou vznikat plísňe. Avšak pod hladinou jsou produkovány řasy, které vyvolávají napětí v trhlinách. [3]

6.3 Fyzikálně mechanické vlivy na trvanlivost cementových kompozitů

Trvanlivostí cementového kompozitu, vzhledem ke změně jeho mechanicko-fyzikálních vlastností, lze rozumět jako odolnost cementového kompozitu vůči působení cyklickému zvlhčování, působení mrazu a vysokých teplot.

Mrazuvzdornost cementového kompozitu lze specifikovat jako schopnost cementového kompozitu ve vodném nasyceném stavu odolávat cyklickému zmrazování a rozmrazování. V pórech a kapilárách může vznikající led vytvořit krystalický tak o síle až 200 MPa. Vzniklý led může zaujmout o cca 9 % větší objem, než by zaujímal ve stavu kapalném.

Požární odolnost vypovídá o odolnosti cementového kompozitu vůči působení vysokých teplot. K výrazné degradaci cementového kompozitu dochází již při teplotě 150°C vlivem rozdílné teplotní roztažnosti kameniva, cementového tmele a oceli. Při vzrůstajících teplotách kolem 350-650°C dochází k uvolnění chemicky vázané vody. Dalším významným bodem je teplota 573°C, kdy dochází k modifikační přeměně křemene (α -křemen na tridymit), která je doprovázena nárůstem objemu křemene. Celkově se vzrůstající teplotou mechanické vlastnosti cementového kompozitu klesají. [3,6]

6.4 Degradace cementových kompozitů vlivem chloridů

Chloridy jakožto soli kyseliny sírové se mohou vyskytovat jak ve vodách průmyslových, tak i přírodních. Největším zdrojem chloridů jsou vody moří a oceánů. Ve vnitrozemských státech je největším producentem chloridů především průmyslová činnost.

Jedny z rizikových konstrukcí, které jsou v ČR vystaveny působení chloridů, jsou zejména dopravní stavby, kde se chloridy používají jako chemicky rozmrazovací látka. Míra agresivity chloridů vzhledem k betonovým konstrukcím je dána především druhem aniontu, na který je chlór vázán. Jsou případy, kdy např. chlorid manganatý při působení na cementový kompozit prakticky nevykazuje žádné korozivní účinky. Jiné druhy chloridů (např. chlorid draselný, chlorid sodný) mohou při kontaktu s železobetonovou konstrukcí způsobit její intenzivní degradaci. Protože většina chloridů je dobře rozpustných ve vodě, mohou tak snadno proniknout do struktury cementového kompozitu a negativně tak ovlivňovat betonovou strukturu. [3]

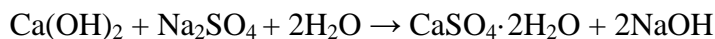
Při vystavení cementového kompozitu chloridům dojde k jejich vzájemné interakci, což zapříčiní korozi III. typu. V mikrostruktuře cementového kompozitu dojde ke vzniku novotvarů s objemově většími krystaly, které svými expanzními tlaky narušují strukturu cementového kompozitu. Vznik těchto krystalů je podmíněn dvěma odlišnými mechanismy. Během prvního mechanismu dojde k reakci mezi chloridy a cementovou maticí, přičemž jako produkt této reakce vzniká Friedlova sůl ($C_3A \cdot 2-3CaCl \cdot 11-15H_2O$). Druhý mechanismus je fyzikálního charakteru, kde vlivem kapilárního nasávání roztoků soli do pórů cementové matrice za současného vypařování vody může způsobit vznik tahových napětí ve struktuře cementového kompozitu. Při vzniku těchto krystalů dochází ke vzniku nežádoucích tlaků, které tak rozrušují cementovou strukturu. [8]

6.5 Degradace cementových kompozitů vlivem síranů

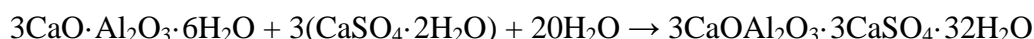
Síranové rozpínání:

Nejběžnějšími sírany, které najdeme jak ve vodách, tak v půdách, jsou sírany vápenaté a sodné. Můžeme se setkat i s „alkalickými“ zeminami nebo vodami, které mohou obsahovat sice méně běžné, ale mnohem nebezpečnější sírany hořečnaté. Prakticky veškeré sírany jsou potenciální hrozbou pro beton. Reagují s $Ca(OH)_2$ z cementového tmelu a s hydratovaným trikalciualuminátem. Během této chemické reakce vznikají pevné částice, které oproti svému původnímu objemu zaujímají větší objem. Tvorbou sádry a ettringitu se tmel až 11krát rozpíná, což může vést k narušení a odprýskávání povrchu cementového kompozitu.

Působení síranů na betonovou konstrukci je typickým příkladem koroze III. typu. Síranová koroze může být vyvolána přírodními i průmyslovými vodami se zvýšeným obsahem iontů SO_4^{2-} . Reakcí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a SO_4^{2-} vznikne sádrovec. Tento proces lze vyjádřit rovnicí:



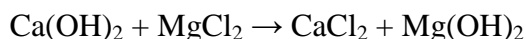
Vzniklý sádrovec za určitých podmínek může dále reagovat s vysoce zásaditými vápenatými hydroalumináty, přičemž dochází k tvorbě jen těžce rozpustného ettringitu. ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Tuto reakci můžeme vyjádřit rovnicí:



Ettringit zvětšuje svůj objem ve stěnách kapilár a pórů, což vede k nežádoucím tlakům, které mají za následek vznik trhlin. Mineralogické a chemické složení cementu má podstatný vliv na jeho odolnost vůči působení síranů. Důležitou roli na odolnost cementového kompozitu má C_3A obsažený v cementu. Vyšší obsah C_2S v cementu snižuje koncentraci vznikajícího $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a tím zvyšuje svou odolnost vůči působení síranů. Vyšší obsah C_3S naopak působí na odolnost cementového kompozitu vůči síranové korozi negativně. [3,8]

6.6 Degradace cementových kompozitů vlivem hořečnatých iontů

Napadení cementového kompozitu hořečnatými ionty patří do skupiny koroze II. typu. Pouze k hořečnaté korozi může dojít účinkem rozpustných hořečnatých solí kromě MgSO_4 . V průběhu reakcí těchto solí s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z cementového kamene dochází k substitučním reakcím typu:



Malá rozpustnost $\text{Mg}(\text{OH})_2$ způsobí, že se veškerý $\text{Ca}(\text{OH})_2$ převede na rozpustnou vápenatou sůl, kterou lze z cementového kompozitu vyluhovat. Hydroxid hořečnatý nemá vazné vlastnosti a nepodílí se tak na zvýšení pevnosti cementového kompozitu. Pokles hodnoty pH umožní vytvoření vhodných podmínek pro hydrolytický rozklad hydrosilikátů a hydroaluminátů vápenatých, které narušují strukturu cementového kamene. [9]

Hořčnaté rozpínání:

Hořčnaté rozpínání lze charakterizovat jako pomalou hydrataci MgO (periklasu) na $\text{Mg}(\text{OH})_2$, který oproti původním minerálům zaujímá až o 150 % větší objem. Proto je v normě obsaženo, že maximální přípustný obsah MgO ve slínku je 6 %. Vzhledem k pomalejší hydrataci MgO probíhá hořčnaté rozpínání po delší dobu, než je tomu u vápenatého rozpínání. [3]

6.7 Degradace cementových kompozitů vlivem vápenatého rozpínání

V cementu se mohou nacházet zbytky nehydratovaného volného CaO. To jen velmi pomalu hydratuje, ale vlivem vlhkosti dochází k postupné hydrataci a ke vzniku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na povrchu zrn CaO. Hydroxid vápenatý zaujímá až o 170 % větší objem než zaujímá CaO. Během této přeměny může vlivem krystalizačních tlaků dojít k destrukci cementového kompozitu. [3]

6.8 Degradace cementových kompozitů vlivem dusičnanů

U železobetonových konstrukcí, které jsou vystaveny posypovým solím, průmyslovým hnojiv, organickým zbytkům může dojít k degradaci cementového kompozitu roztokem dusičnanů. Dusičnanové anionty jsou roztokem transportovány pórovitou strukturou cementového kompozitu z míst s vyšší koncentrací roztoku do míst o nižší vlhkosti, kde následně dojde k jejich rekrystalizaci popř. hydrataci. Dusičnany, během rekrystalizování i hydratačních změn v pórovitém systému, vytváří krystalky dusičnanových solí v podobě výkvětů, které jsou doprovázeny expanzními tlaky pohybujícími se řádově v desítkách MPa. Jestliže tyto síly překročí mez tahové pevnosti cementového kompozitu, dojde k narušení jeho struktury. [10]

7 Trvanlivost sanačních malt pro železobetonové konstrukce

7.1 Definice trvanlivosti

Trvanlivost cementového kompozitu lze vysvětlit jako dobu použitelnosti a odolnosti těchto cementových kompozitů ve stavebním díle, během níž jsou tyto hmoty schopny odolávat působení vnějších vlivů, opotřebení, únavě a stárnutí. Trvanlivostí cementových kompozitů vůči vnějším vlivům působícími na železobetonovou konstrukci poté rozumíme zejména jako jejich odolnost vůči působení atmosféry (periodické změny teploty, zmrazování, zvlhčování, působení slunečního záření), ale i odolností vůči působení agresivních kyselých dešťů a atmosférických plynů jako jsou např. CO_2 , SO_2 , aniž by došlo k nepřipustným změnám jejich vlastností, přesahující normové požadavky. Degradací cementového kompozitu lze poté charakterizovat jako postupné a trvalé narušování jejich základních vlastností vedoucí až k rozpadu tohoto umělého kamene na bázi silikátových pojiv.

Znalost degradace a trvanlivosti železobetonového díla jako kompozitní konstrukce lze shrnout jako dobu použitelnosti konstrukce při zachování jejích deklarovaných vlastností přičemž tato znalost může zároveň sloužit i jako podklad, který vypovídá o celkové životnosti této konstrukce jako celku. [3]

7.2 Trvanlivost cementových kompozitů s portlandskými směsnými cementy

Portlandské směsné cementy umožňují korekci hlavních složek obsažených v cementu. Lze tak využít kladných aspektů jednotlivých složek k dosažení požadovaných vlastností vyrobeného kompozitu. Tyto cementy však v praxi nenacházejí většího využití vzhledem k jejich dostatečně nezmapovaným vlastnostem a chování takto vyrobených cementových kompozitů.

Trvanlivost portlandských cementů s vápencem v prostředí síranů:

Studie Národní technické univerzity v Athénách prokázala nižší trvanlivost u cementových kompozitů vyrobených z portlandských cementů s vápencem (CEM II/B-LL 32,5) v agresivním prostředí síranů oproti referenčním cementovým kompozitům vyrobených z portlandského cementu (CEM I 32,5).

Zkušební tělesa byla uložena po dobu 540 dní v roztoku 5 % Na_2SO_4 . Referenční betonové vzorky byly uloženy v nasyceném roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Na vzorcích bylo po 540 dnech provedeno stanovení pevnosti v tlaku a RTG analýza. Zkušební tělesa byla během celého průběhu uložení vizuálně kontrolována. Výsledky zkoušek a analýz byly srovnány s referenčními vzorky, které byly uloženy v nasyceném roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$. [11]

Betonové vzorky vyrobené z portlandského cementu s vápencem (CEM II/B-LL 32,5) vykazovaly makroskopické trhliny již po 6 měsících jejich uložení v 5 % roztoku Na_2SO_4 . Pevnost v tlaku po 540 dnech se u cementových kompozitů vyrobených z portlandského cementu s vápencem (CEM II/B-LL 32,5) snížila o 33 % oproti cementovým kompozitům uložených v referenčním prostředí nasyceného roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Snížení pevnosti v tlaku bylo nejspíše způsobeno degradací struktury cementového kompozitu vlivem tvorby sádrovce. Struktura cementového kompozitu vykazovala vyšší pórovitost a tím pádem i vyšší propustnost pro agresivní médium. Vznik ettringitu byl omezen nedostatkem C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). U referenčních vzorků z portlandského cementu byl pomocí RTG analýzou prokázán vznik ettringitu. Vzorky vyrobené z portlandského cementu CEM I 32,5 vlivem nízké pórovitosti mají výraznější odolnost vůči vlivu prostředí 5 % Na_2SO_4 na fyzikálně-mechanické vlastnosti po 540 denním uložení. [11]

Portlandské cementy s popílky, či jinými přírodními pucolány, snižují ve struktuře cementového kompozitu potenciál pro vznik ettringitu během působení síranové koroze v důsledku snížení množství hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) v cementového kompozitu [12]. Z tohoto důvodu mají cementy s pucolány příznivý vliv na odolnost cementového kompozitu vůči síranové korozi, protože poměrně dobře omezují vznik sekundárního ettringitu.

Německá cementářská organizace provedla v roce 2005 studii portlandských cementů směsných (CEM II). Studie je zaměřena jednak na sledování vlastností těchto cementů, ale také na trvanlivost cementových kompozitů vyrobených s těmito cementy při působení CO_2 , chloridů a nízkých teplot. Ze závěru této studie vyplývá, že nejefektivnější kombinace hlavních složek cementu je granulovaná vysokopecní struska a vápenec. Po přidání těchto

složek do cementu vykazovala struktura v cementového kompozitu zvýšenou odolnost vůči působení agresivních prostředí CO_2 , chloridů a nízkých teplot [13].

7.3 Trvanlivost alkalicky aktivovaných pojiv

Trvanlivost, která úzce souvisí s životností, byla předmětem dalšího výzkumu. Cementový kompozit s pojivem na bázi PC ztratil při zatížení 80 cyklů v roztoku kyseliny sírové ($\text{pH}=1$) 25 % své hmotnosti, což vypovídá o životnosti tohoto materiálu zhruba 50 let. V porovnání s PC bylo u alkalicky aktivovaných cementových kompozitů pro stejnou ztrátu hmotnosti zapotřebí provést 1400 cyklů. Z toho vyplývá, že životnost těchto pojiv se pohybuje kolem 900 let. Fakt, zda-li může alkalicky-křemičitá reakce probíhat i v alkalicky aktivovaných pojivech je stále předmětem výzkumu. Pro vznik alkalicko-křemičité reakce u alkalicky aktivovaných pojiv je důležité současné spolupůsobení několika faktorů. Tyto faktory jsou prezentovány oxidem uhličitým, alkalickými ionty a vodou.

Alkalicko-křemičitá reakce je započata v okamžiku, když je reaktivní oxid křemičitý z kameniva napaden alkalickými ionty z cementu a vytvoří tak alkalický silikagel, který následně přitahuje vodu a začne expandovat. Expanze tohoto gelu zapříčiní vnitřní pnutí, které může vést až ke vzniku mikrotrhlin ve vnitřní struktuře cementového kompozitu o velikosti 4MPa. Tato interní napětí mohou dosahovat vyšších hodnot, než je samotná pevnost v tahu cementových kompozitů z portlandského cementu, což vede ke vzniku vnitřních trhlin. Nicméně někteří F.Pacheco-Torgal akolektiv se domnívají, že alkalicko-křemičitá reakce neprobíhá pouze mezi alkalickými ionty a amorfním oxidem křemičitým, ale také vyžaduje přítomnost Ca^{2+} iontů.

F.Pacheco-Torgal prokázal, že alkalicky aktivovaný popílek je méně náchylný ke generování expanze alkalického oxidu křemičitého, než je tomu u cementových kompozitů na bázi portlandského cementu. Také poukazují na fakt, že vápník zaujímá velmi důležitou roli v rozsáhlé povaze gelu.

Z nedávných výzkumů vyplývá, že křemičité kamenivo je náchylné k alkalicky-křemičité reakci, proto studie alkalicky-křemičité reakce v alkalicky aktivovaných pojivech není uzavřené téma, alespoň ne pro směsi obsahující vápník. [18]

B) Experimentální část

Experimentální část této práce je zaměřena na laboratorní analyzování působení agresivních prostředí spolu s vysokými teplotami z hlediska jejich vlivu na trvanlivost sanačních malt. Kamenivo svým vysokým procentuálním zastoupením v sanační maltě má velký vliv při návrhu receptury této malty, u níž lze předpokládat, že bude vystavena korozivnímu prostředí a následně požáru.

8 Metodika práce

V **první etapě** je pozornost věnována výběru jednotlivých složek zkoumaných sanačních malt. Důraz byl kladen zejména na složky jako takové separátně se zohledněním předpokládané odolnosti vůči chemicky agresivním vlivům a také šokovému působení vysokých teplot. Výběr surovin jak z primárních, tak z alternativních zdrojů je proveden především na základě dostupných relevantních informací.

Etapa druhá je zaměřena na návrh receptur a laboratorní ověření optimálního poměru pojiva a plniva, dále optimální dávky a selekci typu rozptýlené výztuže, dávky minoritní stabilizační (aktivní) příměsi vč. aktivní substituční složky cementového pojiva a vodního součinitele souvisejícího s požadovanou konzistencí. Pro posouzení optimální dávky bylo využito jak laboratorních zkoušek základních parametrů, tak rešeršních poznatků z předchozích výzkumů.

Následující **třetí etapa** obsahuje především metodické postupy testování trvanlivosti, tj. návrh jednotlivých časových období testování, dále jsou navržena a definována jednotlivé chemicky agresivní prostředí reprezentující reálné vlivy působící na většinu běžných konstrukcí (pro něž jsou vyvíjené sanační malty uvažovány) vč. detailního popisu tepelné expozice zkušebních těles s následným testováním fyzikálně-mechanických a chemických parametrů.

Etapa čtvrtá, která zaujímá z hlediska řešení dominantní pozici, zahrnuje testování a výsledky zkoušení základních sledovaných parametrů, pomocí nichž bylo možné objektivně zhodnotit vliv jednak časového horizontu, dále trvanlivosti v chemicky agresivním prostředí, odolnosti vůči vlivu extrémních teplot vč. posouzení vlivu kombinace uvedených

nepříznivých faktorů. Celkem bylo využito čtyř typů agresivního prostředí zahrnující jak plynné, tak kapalně prostředí s následným teplotním zatížením zkušebních těles až do 1000 °C.

Komplexní vyhodnocení výsledků a zjištění je obsahem **etapy páté**. Na základě provedených rešerší je již nyní jasné, že výstupy diplomové práce budou tvořit významný informační zdroj v této oblasti, neboť nebylo zjištěno, že by byla provedena kombinace testování výše uvedených nepříznivých vlivů a to i v delším časovém horizontu.

9 Použité zkušební metody a postupy

Posouzení míry karbonatace

Stanovení odolnosti vůči karbonataci bylo provedeno v souladu s technickou normou ČSN EN 12395 – Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení odolnosti proti karbonataci.

Podstata zkoušky: Odolnost správkových výrobků nebo systémů proti karbonataci se měří zrychlenou laboratorní zkouškou, při níž jsou zkušební tělesa vystavena atmosféře obsahující 1% CO₂ při teplotě (21±2)°C a při relativní vlhkosti (60±10)%.

Zkušební zařízení: Hermetická skříň, přívod plynu, regulátor vlhkosti, roztok fenolftaleinu, lahev s CO₂

Postup zkoušky: Pro malty se používají zkušební tělesa o rozměrech 40x40x160mm.

Tělesa se uloží do hermetické skříně a nechají se vystavit účinkům plynu oxidu uhličitého, přiváděného v takovém množství, aby mohl vzniknout přetlak. Hloubka karbonatace se měří na čerstvých lomových plochách každého hranolu po ukončení uložení ve skříně, tj. v 56 dnech. Na každý vzorek se nanese vrstva roztoku fenolftaleinu, který slouží jako indikátor. Měření hloubky karbonatace se provádí po (60±5) minutách po nanesení.

Vyjádření a výpočet výsledku: Výsledkem by měla být na všech stranách zkušebního tělesa růžově ohraničená plocha nekarbonatovaného betonu. Normální délka (l) ohraničené plochy nesmí být menší než 30 mm. Na každé straně po obvodu tělesa se délka ohraničené plochy (l) rozdělí na čtyři stejné části, limitované pěti body, jak je znázorněno na obrázku 1a. Pomocí

posuvného měřítka se poté změří hloubka karbonatace ve všech 5 bodech s přesností na nejbližší 0,1 mm. Průměrná hloubka karbonatace se vypočte pro každou stranu zvlášť z 5 hodnot a zaokrouhlí se na nejbližších 0,5 mm. Měření se potom opakuje na zbylých třech stranách. Průměr těchto čtyř vypočítaných hodnot je průměrná hloubka karbonatace pro dané zkušební těleso. Hloubka karbonatace by se neměla lišit o více jak 20 %. Je-li rozdíl naměřených hodnot $\geq 20 \%$ musí se uvést obě hodnoty. Je-li rozdíl $\leq 20 \%$ uvede se průměrná hodnota. [29]

Posouzení míry sulfatace

Stanovení odolnosti vůči sulfataci bylo provedeno zatížením těles chemicky agresivním prostředím Na_2SO_4 .

Korozní kapalně prostředí SO_4^{2-} bylo připraveno jako nasycený roztok Na_2SO_4 o koncentraci 51,2g/l ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$). Kapalně prostředí bylo připraveno jako nasycený roztok rozpuštěním chemikálie (Na_2SO_4) ve vodě z vodovodního řádu do uzavíratelných plastových nádob. Míra degradace správkových malt vzhledem ke korozivnímu prostředí síranů tak bude vypovídat o odolnosti těchto malt vůči síranové korozi.

Posouzení vlivu chloridových iontů při cyklickém zmrazování

Stanovení odolnosti vůči odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek bylo provedeno v souladu s technickou normou ČSN 73 1326, ZMĚNA Z1.

Podstata zkoušky: Tato zkušební metoda je založena na automaticky řízeném cyklickém střídání kladných a záporných teplot, které působí rovnoměrně na celé zkušební těleso. Na jeho povrch, ohraničený objímkou, se nalije 3% roztok chemické rozmrazovací látky. Tato metoda je založena na principu porušování povrchové vrstvy betonové konstrukce, na kterou působí mrazové cykly a roztoky chemicky rozmrazovacích látek. Hlavním faktorem porušování povrchu betonové konstrukce je gradient koncentrace chloridů v povrchové vrstvě betonu.

Zkušební zařízení: Misky z nekorodujícího materiálu, které umožňují ponoření zkušebních vzorků do roztoku chemické rozmrazovací látky a zachycují odpad. Dno misek musí být

opatřeno výstupky, které udrží zkušební těleso v takové poloze, kdy je celá zkušební plocha ve styku s roztokem. Jako chemická rozmrazovací látka se používá 3% roztok chloridu sodného (NaCl). Váhy s přesností vážení 0,1g, sušárna s regulovatelnou teplotou (105 ± 5) °C. Laboratorní síta o délkách ok 0,5; 1; 2; 4. Vysoušecí misky, stříčky a další běžné laboratorní pomůcky.

Postup zkoušky: Zkouší se horní povrch zkušebních těles. Povrch těles se neupravuje a ponechává se tak, jak vznikl při výrobě. Vzorky se vloží do misek, kam se vlije roztok chemické rozmrazovací látky v takovém množství, aby byl vzorek ponořen na výšku 5 ± 1 mm. Po každém 25 cyklu se tento roztok vymění. V klimatizační skříni se vzorky nechají vystavit střídavému zmrazování a rozmrazování. Cyklus se skládá z chlazení na teplotu -18°C, výdrži na této teplotě po dobu 3 hodin a následného ohřevu na +5°C, která je udržována opět po dobu 3 hodin. Tímto je zakončen první cyklus, který trvá 6 hodin. Následují další cykly z nichž každý se zaznamená na počítadle. Po každém 25 cyklu přístroj automaticky zkoušení přeruší a vyjmou se misky spolu se vzorky. Zkušební tělesa se vyjmou z misek a pomocí proudu vody ze stříček se z těles splaví uvolněné částice do misky. Přebytečná kapalina se slije do misky, aby nedošlo k odplavení usazených částic ze vzorku. Pomocí proudu vody ze stříčky se tyto částice přepraví do vysoušecí misky. Z té se přebytečné množství vody opět slije a odpadlé částice se vysuší při teplotě 105°C. Zaznamená se hodnota hmotnosti odpadu v gramech s přesností 0,1g a přepočtou se na plochu povrchu zkušební tělesa 1m^2 . Stanoví se odpad betonu v g/m^2 s přesností na desítky g/m^2 . Odpady z jednotlivých cyklů se uschovají. Jde o součtovou hodnotu odpadu po příslušném počtu cyklů. Tyto hodnoty se vynášejí do grafu. Jejich přímková spojnice vytváří čáru, která vyjadřuje vztah mezi počtem cyklů a hmotnostním množstvím odpadu betonu.

Zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení vody, mrazu a roztoku NaCl se ukončí nejdříve:

- a) po dosažení požadovaného počtu cyklů
- b) po dosažení maximálního přípustného odpadu betonu
- c) při porušení betonu trhlinami, tak že beton přestává být vodotěsný
- d) po 150 cyklech v případě vyšetřování příčin nízké odolnosti betonu a při posuzování způsobu sanace málo odolného povrchu betonu, nenastane-li dříve stav c)

Vyjádření a výpočet výsledku:

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a roztoku NaCl se hodnotí pomocí součinitelů odolnosti D1 až D5, přičemž:

- D1 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu $1\,000\text{ g/m}^2$
- D2 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu $2\,000\text{ g/m}^2$
- D3 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu $3\,000\text{ g/m}^2$
- D4 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu $4\,000\text{ g/m}^2$
- D5 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu $5\,000\text{ g/m}^2$

Z grafu lze stanovením průsečíku čáry odpadů betonu s příslušnou souřadnicí odpadu betonu získat součinitelé D1 až D5.

Součinitel D1 se obvykle uvádí jako kritérium odolnosti betonu proti působení vody a roztoku NaCl.

Jestliže je počítán průměr hodnot součinitele D1 z více zkušebních těles, které byly vyrobeny ze stejné směsi, nesmí se lišit jednotlivé hodnoty o více než 20 % od průměrné hodnoty. Je-li odchylka větší, jednotlivé hodnoty se z výpočtu vylučují. Nastane-li situace, kdy nelze vypočítat průměr ani ze dvou výsledných hodnot, uvedou se všechny zjištěné hodnoty součinitele D1 a doplní se popisem odchylek ve způsobu porušování jednotlivých zkušebních těles.

Dalším zjišťovaným parametrem na takto zatížených tělesech byla objemová hmotnost zkušebních těles ve vysušeném stavu. Pro porovnání těles zatížených chemicky agresivními látkami s tělesy zatíženými dalšími agresivními prostředími byl na takto zatížených tělesech sledován vliv vysoké teploty vzhledem k dosahovaným pevnostem v tlaku a tahu ohybem. [30]

Stanovení míry mrazuvzdornosti

Stanovení odolnosti vůči mrazu bylo provedeno v souladu s technickou normou ČSN 73 1322, ZMĚNA Z1.

Podstata zkoušky: Základní zkouškou mrazuvzdornosti je zkouška střídavého zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových trámčů předem. Počet cyklů je volen vzhledem k požadavkům na stupeň mrazuvzdornosti podle příslušných norem, předpisů nebo projektem.

Zkušební zařízení: Mrazicí box s regulovatelnou teplotou do -20°C , o takových rozměrech, aby zkušební tělesa vyplňovala nejvíce třetinu jeho objemu. Vodní lázeň pro rozmrazování zkušebních těles s automatickou regulací teploty v rozmezí $+15^{\circ}\text{C}$ až $+22^{\circ}\text{C}$.

Postup zkoušky: Zkušební tělesa, které se používají pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu podle ČSN EN 12390-5 jsou nevyztužené trámce čtvercového průřezu. Před prvním uložením zkušebních trámců do mrazicího boxu se trámce vyndají z vody, povrchově usuší a zváží. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles probíhá v zmrazovacích cyklech. Jeden zmrazovací cyklus je složen ze 4 hodin zmrazování a následně 2 hodin rozmrazování. Teplota mrazicího prostředí pro betony vystavené mrazu do -20°C by se měla pohybovat v rozmezí od -15°C do -20°C . Pro betony vystavené mrazu více jak -20°C by se měla teplota mrazicího prostředí pohybovat v rozmezí -18°C až -23°C . Při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody o teplotě $+20^{\circ}\text{C}$. Zkušební tělesa se podrobí požadovanému počtu cyklů po etapách 50 cyklů.

Zkouška mrazuvzdornosti se ukončí nejdříve:

- a) po vystavení zkušebních předepsanému počtu zmrazovacích cyklů.
- b) po ukončení zmrazovací etapy, při které byl naměřen úbytek hmotnosti větší než 5 %.
- c) byl-li nedestruktivním vyšetřováním zjištěn vyhovující průběh kontrolovaného parametru u zkoušek zkrácených nebo naopak nevyhovující průběh parametrů při určitém počtu cyklů.

Vyjádření a výpočet výsledku:

Výsledek zkoušky se uvádí po každé ukončené etapě zmrazování a po celé zkoušce zmrazování:

- a) naměřené hodnoty úbytků hmotností u zkoušených zmrazovacích trámců v % hmotnosti.
- b) pevnosti betonu v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku.
- c) součinitel mrazuvzdornosti betonu po jednotlivých etapách a po ukončení zkoušky.
- d) změna sledovaného parametru nedestruktivní metody, bylo-li použito nedestruktivního vyšetřování dynamickou metodou.

Součinitel mrazuvzdornosti je poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámů v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru pevnosti porovnávacích trámů v tahu za ohybu.

Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitelem mrazuvzdornosti není menší než 75 %, nebo jestliže ukazatel nedestruktivní zkoušky dosáhl hodnoty, která určuje mrazuvzdornost podle příslušných norem nebo předpisů. [31]

Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Podstata zkoušky: Objemová hmotnost ρ správkové malty se stanovuje na zkušebních tělesech po jejich vystavení, agresivnímu prostředí a vysoké teploty.

Zkušební zařízení: Váhy, posuvné měřítko

Postup zkoušky: Objemová hmotnost malty se stanovuje na třech zkušebních tělesech, která se po uložení zváží a výsledek se zaokrouhlí na 0,1 g. Změří se rozměry těles a zaokrouhlí na 0,1 mm. Vypočte se objemová hmotnost ρ , která se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³. Pro větší přesnosti během vyhodnocení experimentu se vypočítaná objemová hmotnost na nejbližších 10 kg/m³ nezaokrouhlovala.

Vyjádření a výpočet výsledku:

$$\rho = \frac{w}{v}$$

w...hmotnost hranolu v kilogramech

v...objem hranolu

Pevnost v tahu ohybem

Stanovení pevnosti v tahu bylo provedeno v souladu s technickou normou ČSN EN 12390-5 - zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

Podstata zkoušky: Zjištění pevnosti v tahu ohybem na zkušebních tělesech, která mohou být zatěžována jedním nebo dvěma břemeny.

Zkušební zařízení: Zkušební lis

Postup zkoušky: Očistí se tlačné desky a zkušební tělesa se uloží na střed, kolmo ke směru zhutnění. Zatěžování pobíhá rychlostí od 0,04-0,06 MPa/s, dokud nedojde k porušení zkušebního tělesa.

Vyjádření a výpočet výsledku:

$$f_{cf} = \frac{2 \cdot F \cdot l}{3 \cdot b \cdot h^2}$$

F...maximální zatížení [N]

l = 3d...vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

b...šířka zkušebního tělesa [mm]

h...výška zkušebního tělesa [mm]

Hodnota pevnosti v tahu se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa. [27]

Stanovení pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt bylo provedeno v souladu s technickou normou ČSN EN 12190-3

Podstata zkoušky: Stanovení pevnosti v tlaku na zbylých polovinách zkušebních těles, které zbyli po zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

Zkušební zařízení: Zkušební stroj pro zkoušku pevnosti v tlaku a pomocný tlačný přístavek podle EN 196-1

Postup zkoušky: Ze zlomených trámů ze zkoušky pevnosti v tahu ohybem vezmeme obě zbylé polovičky trámce a použijeme je pro zkoušku pevnosti v tlaku. Očistí se tlačné desky a zkušební tělesa se uloží na střed, kolmo ke směru zhutnění. Zatěžování pobíhá rychlostí od 0,04-0,06 MPa/s, dokud nedojde k porušení zkušebního tělesa.

Vyjádření a výpočet výsledku:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

F_c ...maximální zatěžovací síla v okamžiku porušení v Newtonech

A...zkoušená plocha o velikosti 1600mm^2

Hodnota pevnosti v tlaku R_c se vypočítá zaokrouhlená na nejbližších $0,5\text{ N/mm}^2$. [28]

XRD analýza

Podstata zkoušky: Rentgenové difrakční analýzy se používají ke stanovení mineralogického (fázového) složení všech látek, které mají krystalický charakter.

Rentgenová difrakční analýza vychází z těchto dvou principů [26]:

- krystalografické uspořádání látek.
- interakce rentgenového záření s částicemi, které tvoří krystalickou mřížku látek.

Každý krystal obsahuje soubor rovnoběžných, v různých směrech proložených mřížkových krystalových rovin. Rovnoběžné roviny, které jsou od sebe stejně vzdáleny, jsou označovány jako stejnocenné roviny a jsou identifikovány Millerovými indexy (h, k, l). Tyto indexy udávají polohu rovin v prostorové mřížce. Mezirovinná vzdálenost těchto rovin se označuje malým písmenem „d“ a dle potřeby může být doplněna o Millerovými indexy „d, h, k, l“. Jestliže známe hodnoty mezirovinných vzdáleností různých minerálů a zjistíme-li hodnotu mezirovinné vzdálenosti zkoumané látky pomocí rentgenové difrakční analýzy, můžeme určit, z jakého minerálu je tvořena (resp. jaké minerály obsahuje). Při rentgenové difrakční analýze se používá charakteristické rentgenové záření, které obsahuje spektrální linie s přesně měřitelnými vlnovými délkami. Charakteristické záření je dáno materiálem antikatody. [26]

Rastrovací elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop MIRA3 se Schottkyho autoemisní katodou je určený pro snímání vodivých i nevodivých preparátů ve vysokém rozlišení. Elektronový mikroskop je optický přístroj, ve kterém jsou elektrony vyraženy z orbitalu atomového obalu. Tyto excitované elektrony se nazývají sekundární elektrony. Vyražení může způsobit například jiný elektron o vyšší energii, rentgenové záření, radioaktivní záření apod. V elektronovém mikroskopu se používají elektromagnetické čočky. Jsou to v podstatě cívky, které vytváří vhodně tvarované magnetické pole. Jedním ze základních parametrů všech

mikroskopů je jejich mezní rozlišovací schopnost. Protože mezní rozlišovací schopnost je úměrná vlnové délce použitého záření a elektrony mají podstatně kratší vlnovou délku (viz vlnové vlastnosti elektronu) než má viditelné světlo, má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího efektivního zvětšení (až 1 000 000×) než světelný mikroskop. [50]

10 Výběr vhodných surovin

POJIVO:

S ohledem na předchozí zjištění [11] byl vybrán portlandský cement třídy 42,5, který byl aplikován v kombinaci s aktivní příměsí, která byla v tomto případě substituční složkou (vysokopecní struska a vysokoteplotní popílek) v množství 35 %. Důvodem této kombinace bylo vyloučení vápence, který by byl obsažen v případě využití CEM 32,5 II.

Cement - HeidelbergCement, Českomoravský cement, Portlandský cement CEM I 42,5 R

Hlavní složkou portlandského cementu je portlandský slínek, který je v cementu zastoupen z 95-100 %. Doplnující složky o 0 – 5 % zastoupení tvoří zbytek do sta procent. Díky tomuto složení může portlandský cement najít využití i v těch nejnáročnějších projektech. Např. pro stavební výrobu cementových kompozitů a malt vyšších pevností a výrobu malt injektážích, kde je využíváno rychlého nárůstu pevností, rychlého a vysokého vývinu hydratačního tepla, vysokých počátečních i konečných pevností a také stálosti fyzikálních i chemických vlastností. Cement je dodáván v 25kg papírovém pytli. [34,35]

Struska - KOTOUČ ŠTRAMBERK spol. s r.o.

Semletím vysokopecní granulované strusky vznikne velmi jemně mletá granulovaná struska. Struska je práškové latentně hydraulické pojivo, u kterého je možno provést aktivaci např. pomocí portlandského cementu. Strusku lze využít do maltových směsí i jako hydraulickou složku do betonových směsí za účelem zvýšení konečných pevností malt a cementových kompozitů a zvýšení jejich odolnosti proti agresivnímu prostředí. [36]

Popílek - Uhelná elektrárna Tušimice, ETU 02, 03

Popílký jsou ve své podstatě nerostné zplodiny vznikající při spalování tuhých paliv spalovaných z velké většiny v jemně mletém stavu. Popílký jakožto malé kuličky křemičitanového skla se usazují v elektrostatických filtrech, cyklonech, komorách nebo jiných zachytných zařízeních tepelných elektráren. Tyto křemičité kuličky, které dosahují průměru od 0,001 až 0,1 mm mají určité charakteristické vlastnosti jako je nízká objemová hmotnost a pucolánová aktivita. Kuličky mohou být plné nebo duté, průhledné či neprůhledné, nažloutlé nebo našedlé. Z mineralogického hlediska se potom jedná o složky křemene, mullitu a zbytků původního paliva, které může být v různém stupni přeměny.

Úletový popílek je jemnozrnný prach, který je složen z roztavených skelných částic kulovitého tvaru s hladkým povrchem. Podle druhu použitého uhlí při spalování rozlišujeme, zda se jedná o křemičitý nebo vápenatý úletový popílek. U křemičitého popílku se z chemického hlediska jedná především o oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid železitý i železičitý. V případě vápenatého popílku se jedná ještě o síran vápenatý a oxid vápenatý. Vápenaté úletové popílký obsahují jak složky pucolánové, tak hydraulicky aktivní minerální fáze. Složení křemičitých úletových popílků vykazuje určitou podobnost s v přírodě běžně vyskytujícími se pucolány v podobě sopečného popela.

Pucolánová aktivita je schopnost reagovat s vápnem a vodou za okolní teploty. Při této reakci vznikají minerální pojivové fáze, které mají určitou podobnost s reakcemi, které vznikají při hydrataci portlandského cementu. Černouhelný popílek vzhledem ke své jemnosti a pucolánové aktivitě nachází uplatnění ve stavebnictví jako částečná náhrada cementu nebo jako příměs do cementového kompozitu za účelem zlepšení určitých vlastností cementového kompozitu.

Funkce, které plní popílek v čerstvém cementového kompozitu, mohou být zlepšení čerpatelnosti betonové směsi nebo zvýšení odolnosti směsi proti krvácení cementového kompozitu. Funkce popílku ve ztvrdlém cementového kompozitu může být zvýšení pevnosti v tlaku, zvýšení odolnosti vůči průsaku tlakové vody. Za zmínku stojí i zlepšení kvality povrchů, u kterých může být dosaženo hladšího povrchu a mohou se vytvářet i jemnější detaily při aplikaci správkových malt. [4,25,37,38]

POLYMERNÍ PŘÍSADA:

Vinnapas - RADKA spol. s. r. o., vinnapas 5043 N

S ohledem na předchozí zjištění [16] byla, s ohledem na příznivý vliv na zpracovatelnost a přilnavost čerstvé malty k podkladu, jako polymerní přísada vybrán Vinnapas. Z chemického hlediska se jedná o kopolymer vinylacetátu a etylenu. Je dodáván ve formě bílého disperzního prášku v 25kg papírovém pytli. Dávkování do sanačních malt je doporučeno v rozmezí od 3 do 5 % z hmotnosti cementu. Polymerní modifikátory na bázi polyvinylacetátu slouží zejména k úpravě konečných vlastností malt. Výhody vinnapasu jako polymerní přísady spočívají zejména ve zlepšení soudržnosti správkové malty s podkladním materiálem. [39]

PŘÍMĚS:

S ohledem na předchozí zjištění [16] byla, z důvodu omezení vnikání chloridových iontů do struktury hmoty a snížení roztažnosti při alkalicko-křemičité reakci, jako příměs zvolena mikrosilika. Použití mikrosiliky bylo zvoleno i z důvodu zvýšení konečných pevností správkových malt.

Silika - RW silicium GmbH, Mikrosilika RW Füller

Hutním procesem křemíku v elektrické obloukové peci získáme amorfni oxid křemičitý. Křemičité úlety RW Füller obsahují 96 % SiO_2 . Silika v práškovém stavu nachází uplatnění v maltách i betonech a je dodáván v pytlích po 20kg. [40]

KAMENIVO:

S ohledem na předchozí zjištění [16] byla vybrána směs dvou rozdílných typů kameniv (amfibolitu a agloporitu). Amfibolit byl vybrán vzhledem k zajištění pevností a vzhledem jeho odolnosti vůči alkalicko-křemičité reakci. Popílkový agloporitu byl vybrán vzhledem k jeho nízkému obsahu SiO_2 , kterého obsahuje pouze kolem 7 %. SiO_2 v krystalické fázi předurčuje toho kamenivo k použití do správkových malt s odolností vůči vysokým teplotám. Dalším důvodem použití agloporitu jsou pouze minimální objemové změny, ke kterým dochází vlivem modifikační přeměny v krystalické fázi křemene. Jako další pozitivní vlastnost tohoto kameniva lze považovat i jeho nízkou objemovou hmotnost. Směs kameniv amfibolitu a agloporitu tak bude muset zaručit, že si správkové malty

vyrobené s touto směsí kameniv během působení vysokých teplot zachovají určité konstrukční pevnosti.

Popílkový agloporit - Výroba na VUT, frakce (0-1)mm

Popílkový agloporit je umělé pórovité kamenivo, které se vyrábí slinováním krátkodobým výpalem. Kamenivo, které bylo použito v této práci je vyráběno sbalkováním létavých popílků z černého uhlí. Tyto syrové sbalky jsou vyráběny na granulačním talíři a následně jsou spékány na aglomeračním roštu. Složení popílku má velký vliv na tepelnou odolnost kameniva. Díky nízkému podílu SiO_2 v krystalické fázi je agloporit vhodný k použití jako kamenivo pro vývoj správkové malty. Jedním z důvodů jsou minimální objemové změny, ke kterým dochází vlivem modifikační přeměny v krystalické fázi křemene. Dalším důvodem je nižší objemová hmotnost agloporitu. [4]

Amfibolit - KÁMEN Zbraslav, a.s., Želešice, frakce (1-2)mm

Amfibolit patří do skupiny metamorfovaných hornin, které jsou těženy pro stavební průmysl. Kamenivo je upravováno tříděním nebo drcením a následně skladováno v zásobnících nebo na speciálních skládkách. Amfibolity jsou anorganické jemnozrnné, sypké přírodní zelenošedé až černé horniny. Drobné a hrubé drcené kamenivo je hutné a odolné vůči alkalicko-křemičité reakci. [41]

Objemová hmotnost $(2700-3100)\text{kg/m}^3$, pevnost v tlaku $(170-280)\text{MPa}$, nasákavost $(0,1-0,4)\%$, sypaná hmotnost $1485,5\text{g}$.

VLÁKNA:

S ohledem na předchozí zjištění [14] byla, vzhledem k pozitivnímu vlivu během působení vysokých teplot, vybrána vlákna polypropylenová. Vlákna a jejich volba při návrhu receptury sanačních malt je ovlivněna nejen materiálem, z něhož jsou vlákna vyrobená, druhem jejich výroby, jejich množstvím při dávkování vláken do malty, ale také tím, zda plní funkci protipožární ochrany. Jako vhodné se jeví využití polypropylenových vláken Fibrin nebo celulózových vláken Ultra fiber 500. V případě vzniku požáru totiž dochází k roztavení a následnému vyhoření těchto vláken, přičemž po nich zůstávají dutiny, kterými může unikat vodní pára a nedochází tak k explozivnímu odtržení vrchních vrstev cementového kompozitu. Kdyby při požáru nedošlo ke vzniku těchto prostorů, vodní pára by neměla kam expandovat a mohla by tak způsobit vznik trhlin a explozivní odprýskávání povrchových

vrstev cementového kompozitu. Tato vlákna byla zvolena i vzhledem k jejich dobrým schopnostem rovnoměrného rozptýlení se v celém objemu čerstvé maltové směsi. Přidáním polypropylenových vláken do maltové směsi lze také poměrně účinně zamezit vzniku smršťovacích trhlin, které mohou vznikat jak v čerstvé maltové směsi během tuhnutí, tak i ve ztvrdlé maltě během tvrdnutí malty. U malt modifikovaných polypropylenovými vlákny lze uvažovat se zvýšením mrazuvzdornosti, vodotěsnosti a odolnosti vůči dynamickému namáhání.

Vlákna polypropylenová - Fibrin 315

Základní stavební jednotkou polypropylenových vláken je propylen, který je tvořen třemi atomy uhlíku a šesti atomy vodíku. Chemický vzorec polypropylenu je C_3H_6 . Polymerizací propylenových molekul vznikne termoplastický polymer polypropylen, který řadíme do skupiny vláken polymerních. Podobu řetězce propylenových jednotek můžeme ovlivnit uspořádáním molekul. V porovnání s jinými polymery vykazuje polypropylen vyšší pevnost, tvrdost, vyšší teplotu tání, a odolnost vůči oděru a chemikáliím. Naopak polypropylenová vlákna jsou méně odolná vůči nízkým teplotám, povětrnostním vlivům a oxidaci. Pevnost v tahu polypropylenu je v rozmezí 22 – 32 MPa, teplota tavení se pohybuje kolem 160 – 170 °C a bod měknutí se pohybuje v rozmezí 140 – 150 °C. Polypropylen se využívá díky jeho poměrně nízké hustotě, která se pohybuje v rozmezí 900 – 910 kg.m⁻³. Polypropylenová vlákna jsou poměrně odolná vůči chemikáliím díky jejich nepolární struktuře a jsou tedy stabilní i v zásaditém prostředí betonové směsi. Vykazují minimální navlhavost a nízký sklon k nabíjení se statickou elektřinou.

Dávkování polypropylenových vláken se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,8 do 1,1 kg.m⁻³ cementového kompozitu. Každé PP vlákno má přesně specifikované vlastnosti a od tohoto je odvozena i jeho účinnost ve výsledném kompozitu, jako je beton. Vlákna po kvalitním rozmísení vytvoří v betonové směsi třídimenzionální strukturu. Tato struktura je potom základem pevnostního chování vláknobetonu.

Polypropylenová vlákna se vyrábí o délce cca 5 – 15 mm a o průměru 10 – 20 μm. Rozdělení běžně prodávaných polypropylenových vláken je dvojí. Zaprvé na vlákna monofilamentní, která se vyrábějí jednotlivě s hladkým kruhovým průřezem a zadruhé na vlákna fibrilovaná, která jsou vyráběna z fólie s drsnějším hranatým průřezem. Jediná povrchová úprava polypropylenových vláken spočívá v aviváži nebo lubrikaci, která při kontaktu s vodou nebo vlhkostí umožní rozprostření jednotlivých vláken v celém objemu cementového kompozitu, což je u vláken tohoto typu jedním z velkých problémů. Vlákna

jsou totiž vyrobena z materiálu, který je nesmáčivý vodou. Někdy se u hydrofobního materiálu, jakým polypropylen je, stane, že vlákna vyplavou na povrch betonové směsi, nebo vytvoří shluky. Ty zaplní objem matrice pouze nerovnoměrně a tím pádem nedojde k plnému využití efektu vyztužení. To může spolu se zadrženými vzduchovými póry mezi shluky vláken vést ke snížení pevnosti cementového kompozitu. Povrch vytvořený výrobou příznivě ovlivňuje účinnost kotvení vláken v cementové matrici. Počet vláken i rozptýlení vláken v třídímenzionálním systému cementové matrice ovlivňují jejich výztužný účinek v celkovém cementovém kompozitu. Velmi dobře se dá využít vlastnosti monofilamentních vláken, kdy jich ve stejné hmotnostní jednotce s kruhovým průměrem 18 μm bude víc než vláken fibrilovaných, které mají několikanásobně větší průřez než je průřez vláken monofilamentních. Je možné uvést, že při stejné hmotnostní dávce vláken mají větší výztužné účinky vlákna monofilamentní. 1 kg PP vláken představuje zhruba 300 miliónů jednotlivých vláken, což znamená, že i při velmi malé dávce je cementový kompozit vyztužen relativně velkým počtem vláken. Díky této vlastnosti je výsledný objem cementového kompozitu vyztužen velkým množstvím vláken v malých vzdálenostech. Při porovnání soudržnosti vláken ocelových s vlákny monofilamentními nebo fibrilovanými je soudržnost polypropylenových vláken řádově nižší. Z toho vyplývá, že k porušení dochází nejčastěji vytržením vláken z matrice, čímž prakticky dochází k vyčerpání jejich potenciálu. Lze konstatovat, že polypropylenová vlákna nemají žádný zásadní vliv na výslednou pevnost cementového kompozitu. Této vlastnosti se dá využít v případě betonáže rozlehlých ploch. Polypropylenová vlákna jako taková se do cementového kompozitu přidávají především pro zamezení vzniku trhlin, které mohou vznikat při sedání a smršťování cementového kompozitu v raných fázích tuhnutí a tvrdnutí, což vede ke zvýšení trvanlivosti cementového kompozitu. Případně vzniklou trhlinou by do struktury cementového kompozitu mohla prosakovat voda nebo chemikálie a snížit tak jeho mrazuvzdornost a schopnost cementového kompozitu odolávat agresivnímu prostředí. [14]

Vlákna celulózová - Ultra fiber 500

Celulózová vlákna Ultra Fiber 500 jsou modifikovaná vlákna, která jsou odolná vůči alkalickému prostředí a při rovnoměrném rozptýlení vláken v celé maltové směsi snižují riziko vzniku smršťovacích mikrotrhlin. Celulózová vlákna také pozitivně ovlivňují hydrataci cementu. Vlákna jsou hydrofilní a jsou schopna absorbovat až 85 % své hmotnosti vodu z čerstvého cementového kompozitu. V počáteční fázi hydratace tuto vodu zadržují a snižují tak krvácení cementového kompozitu, v druhé fázi je poté voda z vláken postupně

uvolňována a tím je podpořena hydratace cementového kompozitu. Dobrá odolnost vláken vůči alkalickému prostředí je dána jejich povrchovou úpravou, kdy jsou vlákna potažena speciální látkou. Celulózová vlákna určitou měrou také zlepšují křehkost, odolnost proti nárazu a odolnost cementového kompozitu proti oděru. Vlákná snižují propustnost cementového kompozitu, zvyšují požární odolnost a odolnost vůči mrazu. Výrobce uvádí, že doba míchání cementového kompozitu s celulózovými vlákny by měla být asi o 20 sekund delší než u míchání cementového kompozitu prostého. Vyztužující vlákna se nejlépe rozptýlí při přidání na začátku dávkovací sekvence, obvykle s vodou.

Tato vlákna se využívají při výrobě prostého i armovaného cementového kompozitu. Jejich vlastností lze využít jak při výrobě prefabrikovaného zboží, jako jsou například obrubníky, tak i při betonáži podlah, chodníků, příjezdových cest, bazénů, při technologii stříkaného cementového kompozitu a také při povrchových úpravách betonových konstrukcí.

Vlákná Ultra Fiber 500 mají pevnost v tahu v rozmezí 620 – 900 MPa s průměrnou délkou vlákna 2,1 mm a jmenovitým průměrem vlákna 16 μm . Dávka vláken UltraFiber 500 se pohybuje v rozmezí od 0,9 do 9,0 kg/m^3 . Výrobce též uvádí, že beton vyrobený s těmito vlákny splňuje požadavky na požární odolnost a to 90 minut, jak je popsáno v AS3600 / NZS3101: 2006 / ISO834 (90/90/-). [44,45,46]

VODA:

Záměsová voda byla použita z vodovodního řádu. Byla použita v souladu s požadavky ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu-specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně jako záměsové vody do betonu.

11 Návrh a ověření vhodnosti složení receptur

Pro experimenty byly uvažovány dva typy receptur jako správkových malt, které vychází z kombinace cementu spolu se struskou nebo popílkem.

Příprava zkušebních těles probíhala v laboratorních podmínkách. Množství pojiva, kameniva, ostatních příměsí i vody bylo naváženo s přesností 1 g. Vlákná byla navážena s přesností 0,1 g. Popílkový agloporit frakce 0-1 mm se nechal nasáknout množstvím vody, které odpovídalo hodnotě nasákavosti kameniva. Malty byly míchány pomocí elektrické ruční míchačky, přičemž nejprve byly společně zamíchány obě frakce kameniva a poté byly přidány a zhomogenyzovány i ostatní suché složky. Stěny míchací nádoby se setřely a celá směs byla zamíchána spolu s vodou. Nakonec byla přidána vlákna a celá směs byla pro dokonalou homogenizaci všech složek míchána cca 2 minuty. Plnění malty do forem probíhalo při současném hutnění pomocí vibračního stolu maximálně po dobu 30 sekund. Poté se pomocí zednické lžíce zarovnal povrch zkušebních těles. Celková doba od namíchání maltové směsi do jejího naplnění do formy nepřesáhla 15min. Vyrobená tělesa byla uložena v souladu s příslušnou technickou normou 3 dny ve vlhkém prostředí a 25 dní v prostředí laboratoře

Následně byly testovány základní fyzikálně-mechanické parametry, tj. objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a tlaku.

11.1 Stanovení optimálního poměru pojiva a plniva

Pro stanovení dávky cementu bylo použito kamenivo Amfibolit frakce 0-2 mm. V první etapě byl zkoušen poměr pojiva ke kamenivu, kde byly pro další testování stanoveny poměry na 1:2,5 a 1:3. Voda byla dávkována s ohledem na konzistenci a zpracovatelnost směsi. Při vodním součiniteli 0,42 bylo u obou poměrů pojiva a kameniva dosaženo plastické konzistence. S ohledem na stanovení zkoušky soudržnosti cementové malty s podkladem byla navržená receptura navýšena o 25 % oproti svému původnímu objemu. Na vlhkou betonovou dlaždici byla nanášena vrstva malty o tloušťce 20 mm.

Vzhledem k získaným poznatkům a naměřeným hodnotám pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku a stanovení přídržnosti k podkladu byl konečný poměr pojiva ke kamenivu stanoven na 1:2,5.

11.2 Stanovení optimální dávky polymerní přísady

S ohledem na předchozí zjištění [16] bylo množství vinnapasu jako polymerní přísady stanoveno na 3 % z hmotnosti cementu. Pro testování optimální dávky polymerní přísady do správkové malty byly vytvořeny sady zkušebních těles. Na čerstvé maltě byla sledována konzistence malty z hlediska zlepšení zpracovatelnosti malty, doby míchání a přilnavosti malty k navlhčenému betonovému podkladu, ale i dalších charakteristik jako jsou pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a odolnost vůči vysokým teplotám.

11.3 Stanovení optimální dávky příměsi

S ohledem na předchozí zjištění [16], kde se jako doporučené dávkování mikrosiliky uvádí (5 – 15)%, byl obsah mikrosiliky stanoven na 5 % z hmotnosti cementu.

11.4 Stanovení optimálního poměru dvou typů kameniv

Jako optimální poměr kameniva byl navržen poměr agloporitu frakce (0-1)mm a amfibolitu frakce (1-2)mm 1:1. Kamenivo bylo vybráno podle několika hledisek, dle rešerší literatury, dle provedených zkoušek, ale také podle jejich dostupnosti a jejich pořizovací ceny. Vzhledem k pořizovací ceně se v tuto dobu jeví jako výhodné využití popílkového agloporitu. Popílkový agloporit má nízkou objemovou hmotnost a při jeho použití tak dochází k přímému vylehčení malty. Dalším kamenivem je amfibolit, který má dobrou pevnost a odolnost vůči vysokým teplotám.

11.5 Výběr typu rozptýlené výztuže

Za účelem porovnání vlivu dvou typů vláken na výsledné vlastnosti malt byly navrženy dvě receptury. Jedná se vlákna polypropylenová, u kterých je doporučené dávkování $1,00 \text{ kg/m}^3$ a vlákna celulózová, u kterých je doporučené dávkování $0,45 \text{ kg/m}^3$.

Vzhledem k předchozím výzkumům a ke shrnutí výsledků byly vyhodnoceny jako vyhovující vlákna polypropylenová. Jejich optimální dávka byla však stanovena na $1,05 \text{ kg/m}^3$. Vliv jednotlivých druhů vláken na požární odolnost malty byl testován pouze při teplotě 500°C z důvodu zamezení vzniku případných objemových změn způsobených modifikačními přeměnami křemene, které nastávají kolem teploty 573°C a narušují tak strukturu zkušebních těles a následně tak i ovlivňují výsledky pevností v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. V praxi by poté měla tato vlákna pozitivně ovlivnit zachování mechanických vlastností správkové malty na železobetonové konstrukci vystavené vysokým teplotám a měla by tak i prodloužit dobu únosnosti této konstrukce při požáru.

Tabulka 4: Přehled vlastností polypropylenových vláken.

Vlastnost / typ vlákna	Fibrin 315
materiál vlákna	polypropylen
hustota	910 kg/m^3
délka vlákna	12 mm
průměr vlákna	$16 \mu\text{m}$
bod tání	160°C
doporučené dávkování	1000 g/m^3

Tabulka 5: Přehled vlastností rozptýlené výztuže na bázi celulózy.

Vlastnost / typ vlákna	UltraFibre 500
materiál vlákna	přírodní na bázi celulózy
hustota	1100 kg/m^3
délka vlákna	1,9 - 2,3 mm
průměr vlákna	14 - 17 μm
bod tání	135°C
doporučené dávkování	450 g/m^3

11.6 Receptury pro testování trvanlivosti správkových malt

Návrh receptury vyplývá z předchozích zkoušek, kdy byla jednotlivě testována vhodná množství pojiva, kameniva, vláken i ostatních přísad pro návrh správkové malty. Byly namíchány 2 sady zkušebních těles, každá po 132 vzorcích. Před mícháním se vždy nechal popílkový agloporit nasáknout množstvím vody, které odpovídalo jeho nasákavosti. Vodní součinitel byl v závislosti na obsahu vody v agloporitu upraven. Výsledný vodní součinitel je stanoven s ohledem na dosažení plastické konzistence a vzhledem ke zpracovatelnosti správkové malty.

Podle vizuálního hodnocení bylo u malt dosaženo hutné struktury bez segregace kameniva. Sledována byla přilnavost k podkladu a zpracovatelnost správkové malty. Konzistence zkouškou rozlitím se pohybovala v rozmezí 150 mm. Po vyvržení těchto malt nebyl pozorován vznik smršťovacích trhlin nebo vad týkajících se vlastní výroby zkušebních těles. Z hlediska zpracovatelnosti malty se kladně projevil poměr mísení pórovitého popílkového agloporitu a amfibolitu, obsah polymerní přísady i množství polypropylenových vláken. Pozitivní vliv na odolnost vůči vysokým teplotám vykazuje kamenivo amfibolit i polypropylenová vlákna. Přídavkem siliky by mělo dojít ke zlepšení vlastností správkových malt. Dosažení se týká statické funkce malt u počátečních i konečných pevností. Před vlastní výrobou se nechalo nasáknout agloporitové kamenivo množstvím vody, které odpovídalo jeho nasákavosti, aby nedocházelo k odebírání vody, která je potřebná k hydrataci cementu. Nasákavost agloporitového kameniva byla 57 %. V reakci na nasákavost kameniva bylo sníženo množství záměsové vody. Množství záměsové vody tak bylo sníženo o množství vody, které bylo přidáno ke kamenivu. V práci byla používána směs vysokoteplotního popílku z elektrárny Tušimice, která se skládala z ETU 02 a ETU 03. Popílek z ETU 02 byl zastoupen z 80% a popílek z ETU 03 byl zastoupen z 20 %.

Tabulka 6: Receptura cementu a strusky.

Receprura 1	[%]	[kg/m ³]
poměr kameniva : cement = 2,5 : 1		
cement - CEM I 42,5 R	65	435,0
struska	35	234,2
silika	5	25,7
vinnapas	3	15,42
agloporit frakce 0-1mm	50	836,6
amfibolit frakce 1-2mm	50	836,6
vlákna Fibrin		1,05
voda		104l

Tabulka 7: Receptura cementu a popílku.

Receprura 2	[%]	[kg/m ³]
poměr kameniva : cement = 2,5 : 1		
cement - CEM I 42,5 R	65	435,0
popílek	35	234,2
silika	5	25,7
vinnapas	3	15,42
agloporit frakce 0-1mm	50	836,6
amfibolit frakce 1-2mm	50	836,6
vlákna Fibrin		1,05
voda		104l

12 Podmínky expozice zkušebních těles

Metodika byla rozdělena do několika etap, týkajících se vývoje správkové malty odolné vůči působení chemicky agresivního prostředí a vysokých teplot.

1. etapa - návrh a vývoj receptur

Pojivo: stanovení jeho množství

- 1) CEM I 42,5 R + struska + silika
- 2) CEM I 42,5 R + popílek + silika

Plnivo (pouze jemnozrnné): ověření vhodnosti kameniva

- 1) agloporit frakce (0-1mm)
- 2) amfibolit frakce (1-2mm)
- 3) vinnapas

Vlákna: navrhnutí druhu a optimální dávky vláken

- 1) polypropylenová vlákna Fibrin 500
- 2) vlákna Ultra Fiber

Voda: posouzení konzistence

2. etapa - zkoušení navrhovaných receptur po 7 dnech – orientační pevnosti a objemové hmotnosti, zjištění množství a druhu pojiva, kameniva, ostatních příměsí, vláken a zjištění vodního součinitele. Následná optimalizace složení malt je nejen vzhledem k složení směsí, ale i vzhledem ke konzistenci a zpracovatelnosti čerstvé sanační malty

3. etapa - výběr agresivních prostředí

Plynné (na základě norem):

- 1) CO₂ (ČSN EN 13295) – zkoušení odolnosti malt vůči karbonataci v prostředí 1% CO₂, při 75% relativní vlhkosti

Kapalné (dle zadání):

- 1) sírany – zkoušení odolnosti malt vůči sulfataci v roztoku síranu sodného a vody o koncentraci 51,2 g/l
- 2) chloridy - zkouška odolnosti malt vůči CHRL v 3% roztoku NaCl (50 cyklů)

Kombinace (výběr na základě norem a teoretického průzkumu):

- 3) zmrazovací cyklus – zkoušení mrazuvzdornosti malt (50 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů v rozmezí teplot od -20°C do +20°C)

4. etapa - doba expozice a měření

- 1) zrání je standardních 28 dní (3 dny ve vlhkém prostředí + 25 dnů v laboratorním prostředí)
- 2) uložení těles v agresivních prostředích bylo 45 a 90 dní
 - 1) zkoušení odolnosti vůči teplotnímu namáhání referenčních těles a těles vystavených chemicky agresivnímu prostředí bude probíhat za teplot (22°C, 400°C, 600°C, 1000°C).

Vyhodnocení pomocí fyzikálně-mechanických a fyzikálně-chemických analýz (pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, XRD analýzy, mikroskopického měření)

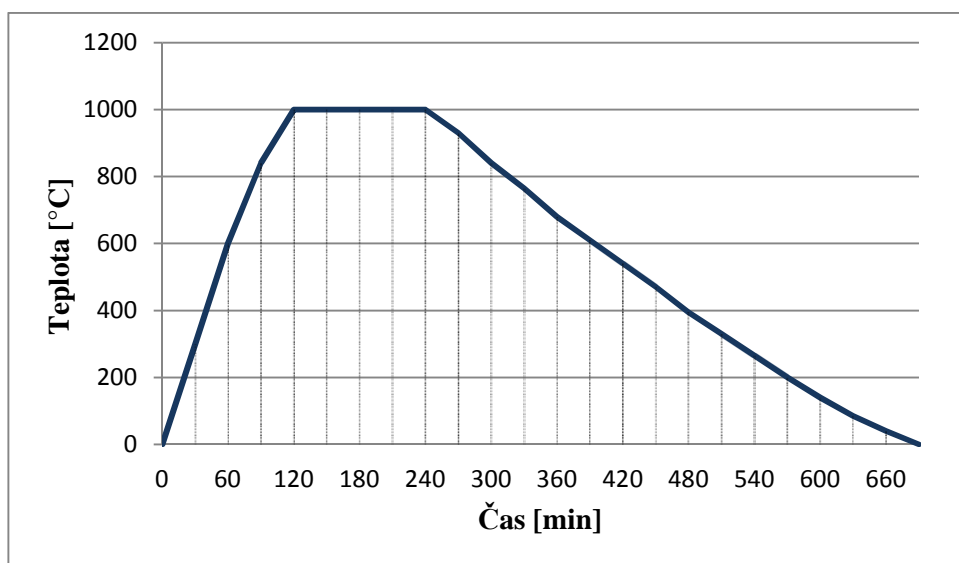
Cílem práce bylo porovnat míru degradace pomocí fyzikálně-mechanických a fyzikálně-chemických zkoušek u zkušebních těles reprezentujících vlastnosti správkových malt, které byli nejprve vystaveny chemicky agresivnímu prostředí v čase $t_1 = 45$ dní a $t_2 = 90$ dní, a

následně byli zatíženi vysokou teplotou o hodnotách 400°C, 600°C, 1000°C. Vlastnosti takto zatížených těles byly následně porovnány s vlastnostmi těles referenčních, která byla zatížena pouze vysokou teplotou.

Zatížení zkušebních těles vysokou teplotou

Zkušební tělesa po 45 i 90 denním uložení v klimatizační komoře, v kádi s roztokem síranů, ale i zkušební tělesa, která byla vystavena 50 zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům při zkoušce mrazuvzdornosti či tělesa, která byla vystavena 50 cyklům v prostředí s NaCl, byla před vlastním vystavením vysokých teplot nejprve vysušena v sušárně při teplotě 105°C do ustálené hmotnosti.

Simulace požáru byla prováděna v elektrické peci, kde byly nastaveny parametry rychlosti nárůstu teploty, doby trvání izotermní výdrže na stanovené maximální teplotě a pozvolný pokles teploty při chlazení. Kromě testování vhodnosti vlivu vláken na požární odolnost, kdy byla zatěžovací teplota nastavena na 500°C, a to z důvodu zamezení vzniku objemových změn způsobených vlivem modifikačních přeměn křemene v kamenivu. Během testování složení správkových malt z hlediska množství kameniva, pojiva i ostatních přísad byly maximální teploty nastaveny na (400, 600 a 1000)°C. Nárůst teploty byl nastaven na 10°C za minutu. Doba, po kterou byla zkušební tělesa vystavena maximální teplotě, byla nastavena na 2 hodiny. Teplotní pokles při chladnutí byl nastaven na 1°C za minutu. Celkový čas teplotního zatěžování od nárůstu teploty až po chlazení na teplotu okolního prostředí se pohybuje kolem 20 hodin při maximální dosažené teplotě 1000°C.

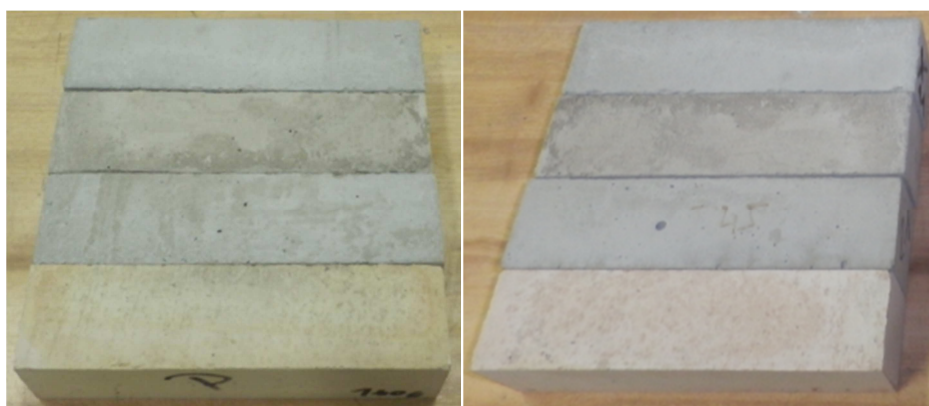


Graf 3: Křivka teplotního zatížení

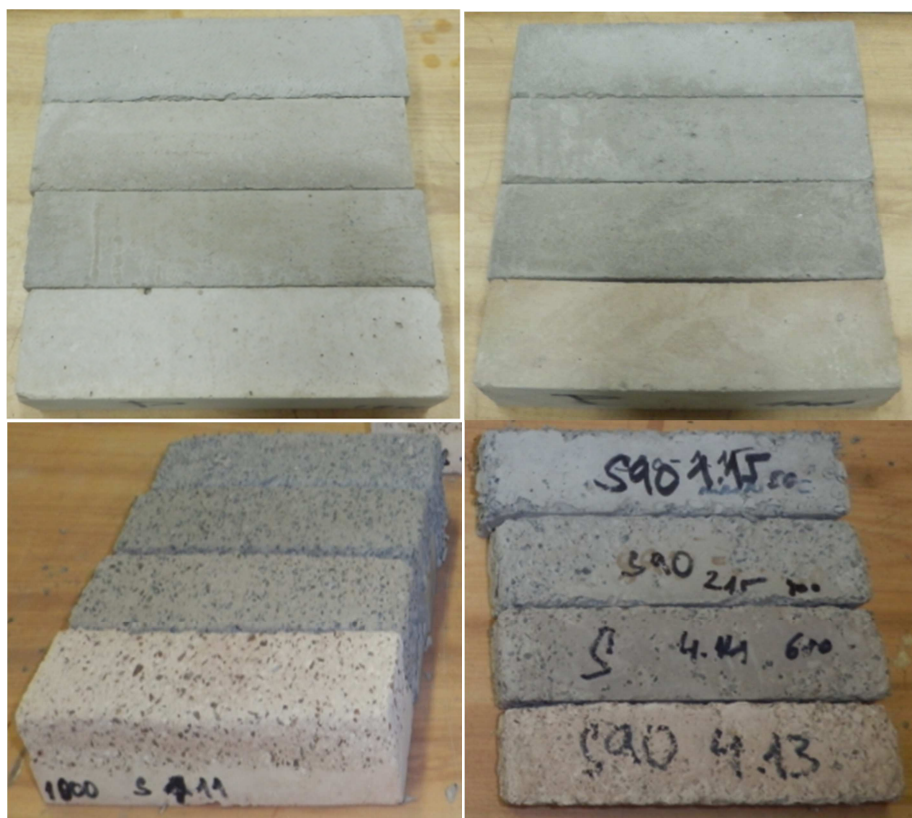
13 Vizuální posouzení zkušebních těles v průběhu testování



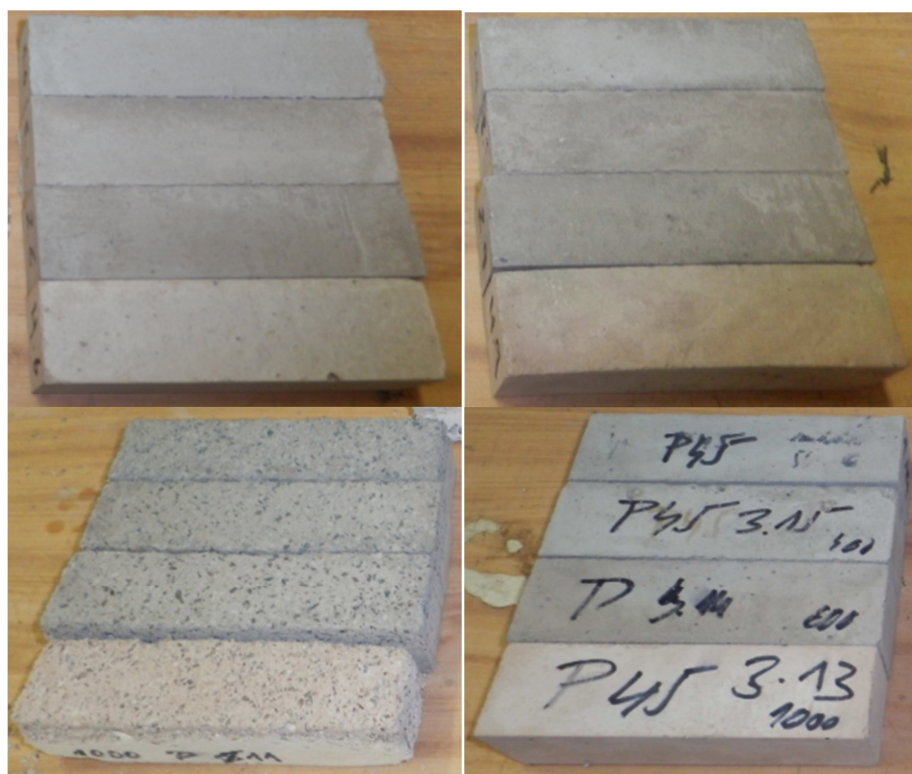
Obrázek 7: Porovnání hloubky karbonatace u správkových malt (P45 – receptura s popílkem po 45 denním vystavení malt působení CO_2 , S45 a S90 receptury se struskou po 45 a 90 denním vystavení malt působení CO_2).



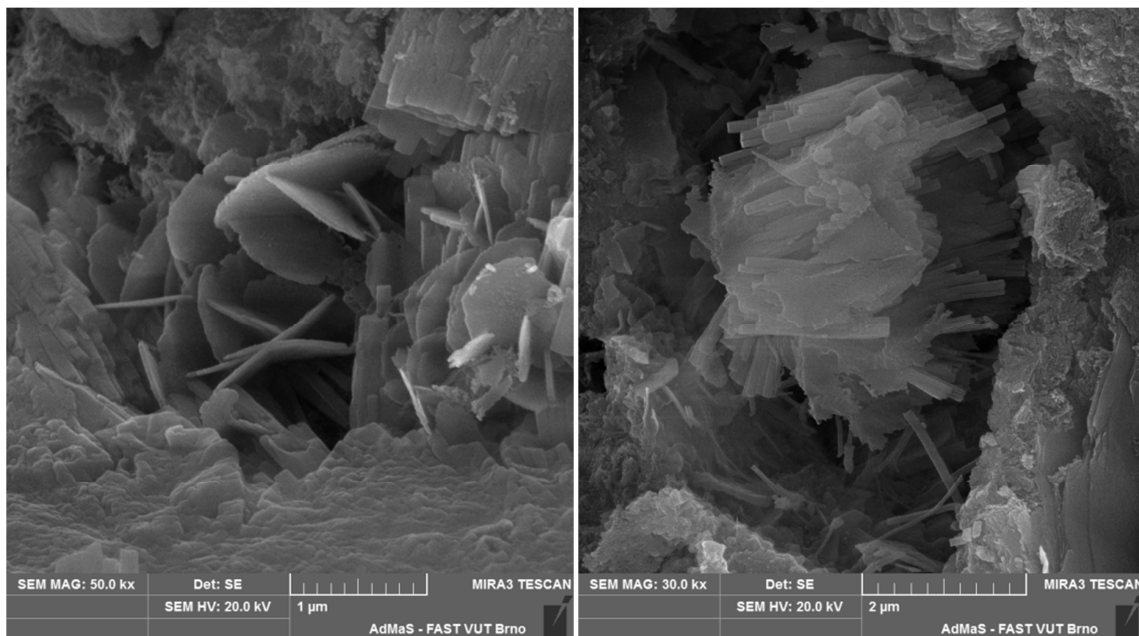
Obrázek 8: Referenční malty se struskou na obr. vlevo a popílkem na obr. vpravo zatížené teplotami (sestupně 22°C, 400°C, 600°C, 1000°C).



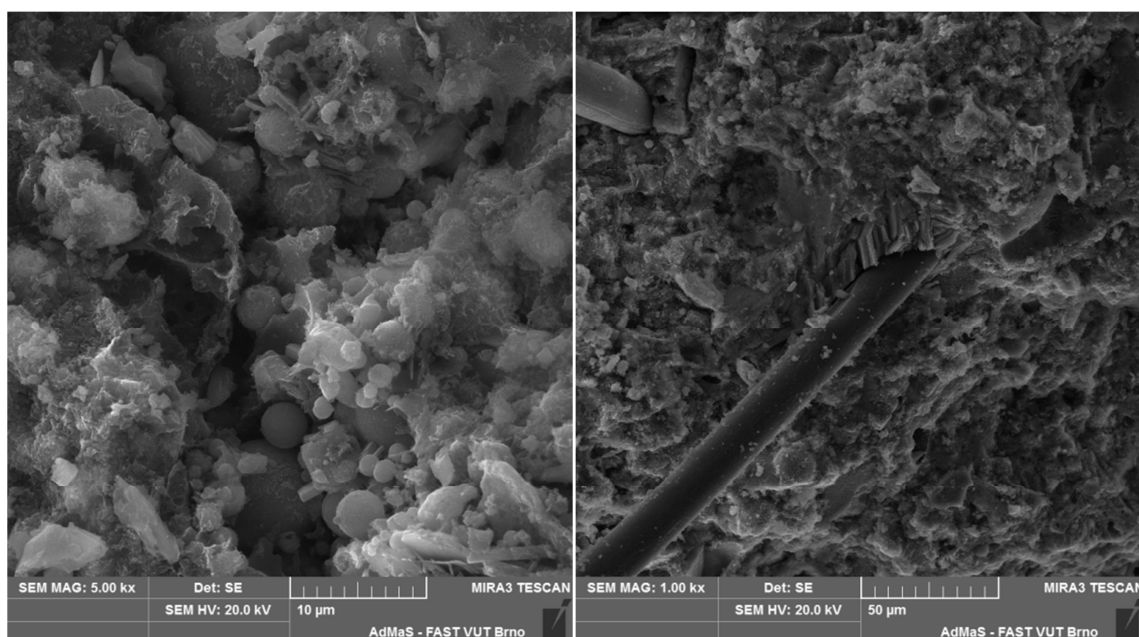
Obrázek 9: Referenční malty se struskou zatížené teplotami (sestupně 22°C, 400°C, 600°C, 1000°C) po působení CO_2 na obr. vlevo nahoře, SO_4^{2-} na obr. vpravo nahoře, CHRL na obr. vlevo dole, mrazem na obr. vlevo dole.



Obrázek 10: Referenční malty s popílkem zatížené teplotami (sestupně 22°C, 400°C, 600°C, 1000°C) po působení CO_2 na obr. vlevo nahoře, SO_4^{2-} na obr. vpravo nahoře, CHRL na obr. vlevo dole, mrazem na obr. vlevo dole.



Obrázek 11: Na vzorcích správkové malty s obsahem strusky po zatížení agresivním prostředím oxidem uhličitým je na obr. vlevo zobrazen kalcit při 50 000 násobném zvětšení a na obr. vpravo je zobrazen portlandit při 30 000 násobném zvětšení.



Obrázek 12: Na vzorcích správkové malty s obsahem strusky po zatížení agresivního prostředí oxidem uhličitým jsou na obr. vlevo zobrazeny kuličky popílku při 5000 násobném zvětšení a na obr. vpravo je zobrazeno polypropylenové vlákno při 1000 násobném zvětšení.

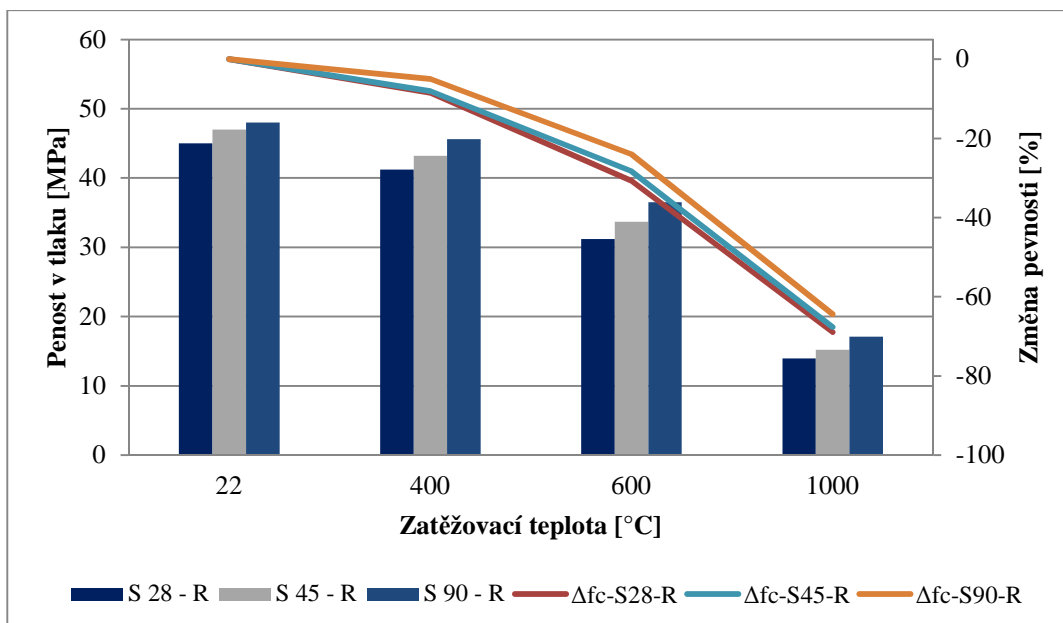
14 Výsledky testování sanačních malt

V následujících grafech (viz Obr. 3 až 38) jsou uvedeny výsledky testování a analyzování zkoumaných navržených sanačních malt. V první řadě byl hodnocen vývoj parametrů ve stáří 28, 45 a 90 dní vč. tepelné odolnosti. Dále byl hodnocen vliv působení jednotlivých agresivních prostředí tepelně nezatížených malt ve stáří 45 a 90 dní. V poslední fázi byla testována tělesa nejprve expozicí v chemicky agresivním prostředí s následným vystavením extrémní teplotě rovněž ve stáří 45 a 90 dní. V každém grafu jsou pro danou recepturu uvedeny procentuální odchylky od referenčních těles a to jak v případě degradace chemickými činiteli, tak teploty. V případě působení jejich kombinace jsou také uvedeny procentuální odchylky tepelné odolnosti vůči referenčním maltám.

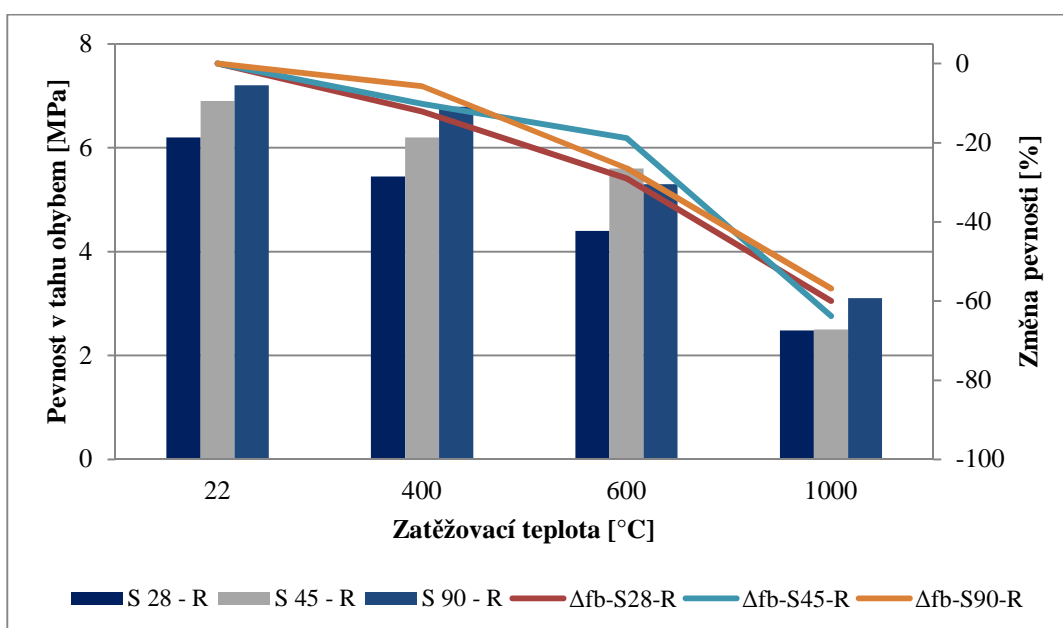
14.1 Fyzikálně-mechanické zkoušky

14.1.1 Vývoj vlastností a tepelné odolnosti v čase

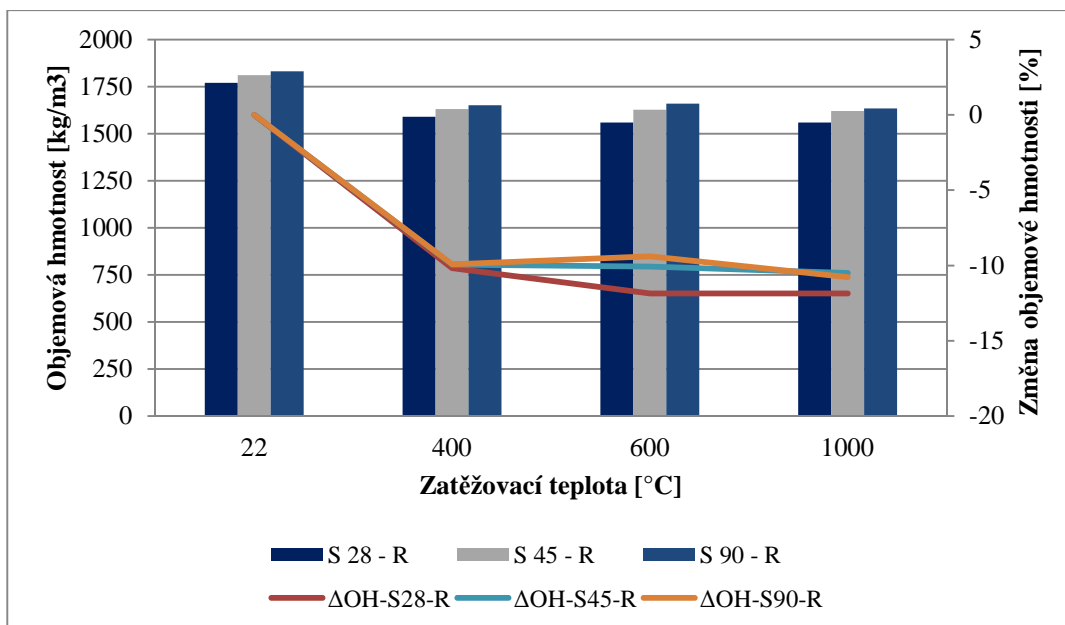
Pro každý graf jsou vytvořeny křivky s plnou čarou, znázorňující procentuální změny parametrů vlivem teploty, které jsou označeny symboly Δf_c , Δf_b a ΔOH .



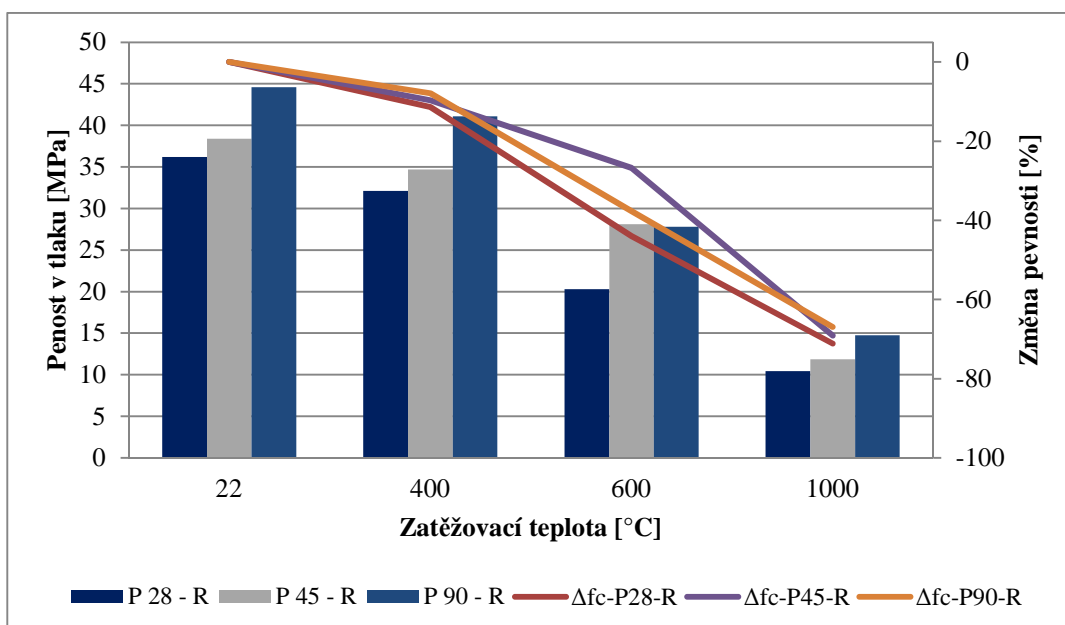
Graf 4: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.



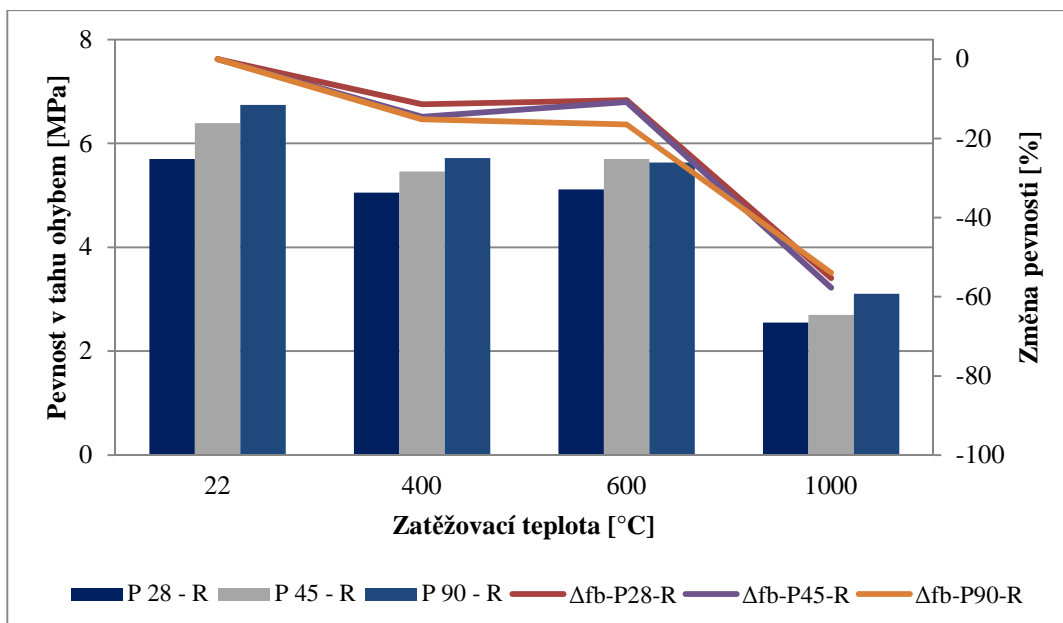
Graf 5: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.



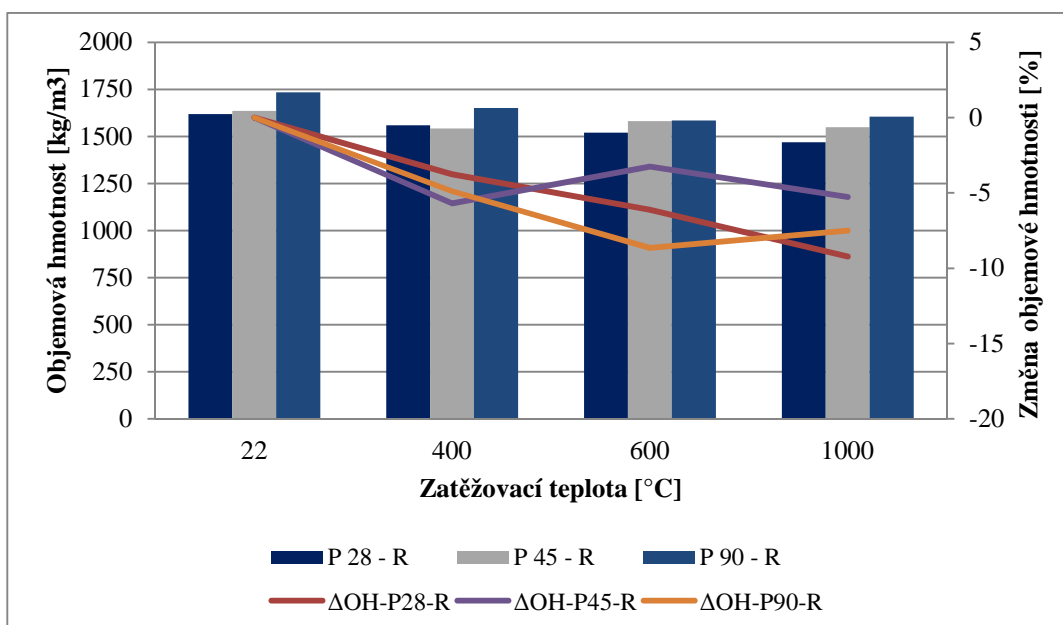
Graf 6: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.



Graf 7: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.



Graf 8: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.



Graf 9: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.

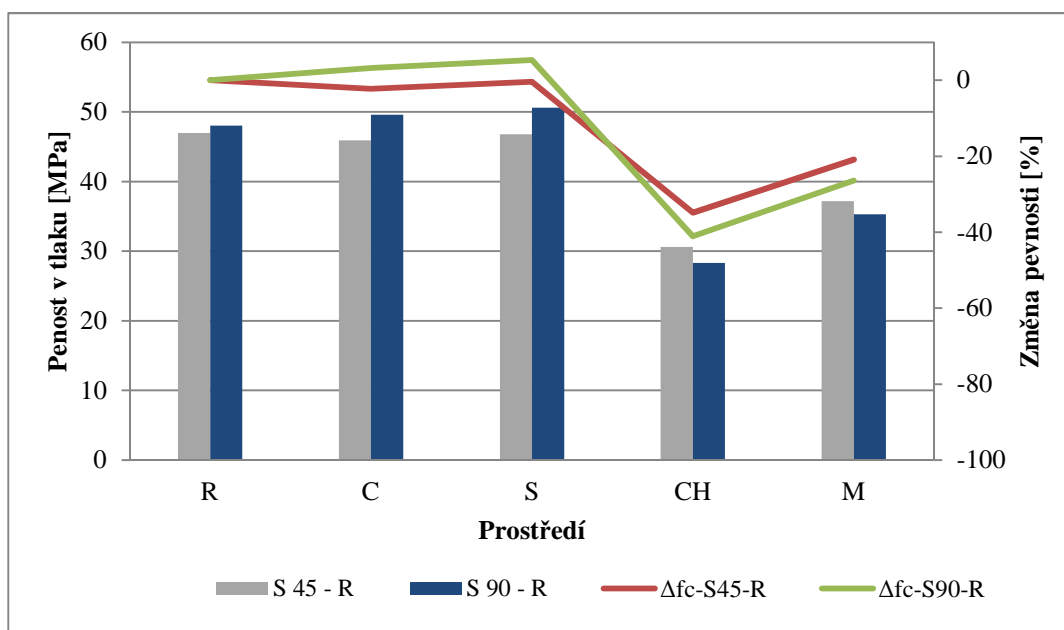
Vyhodnocení působení vysokých teplot:

Celkově jsou správkové malty s částečnou náhradou cementového pojiva struskou vzhledem působení vysokých teplot odolnější než správkové malty s částečnou náhradou

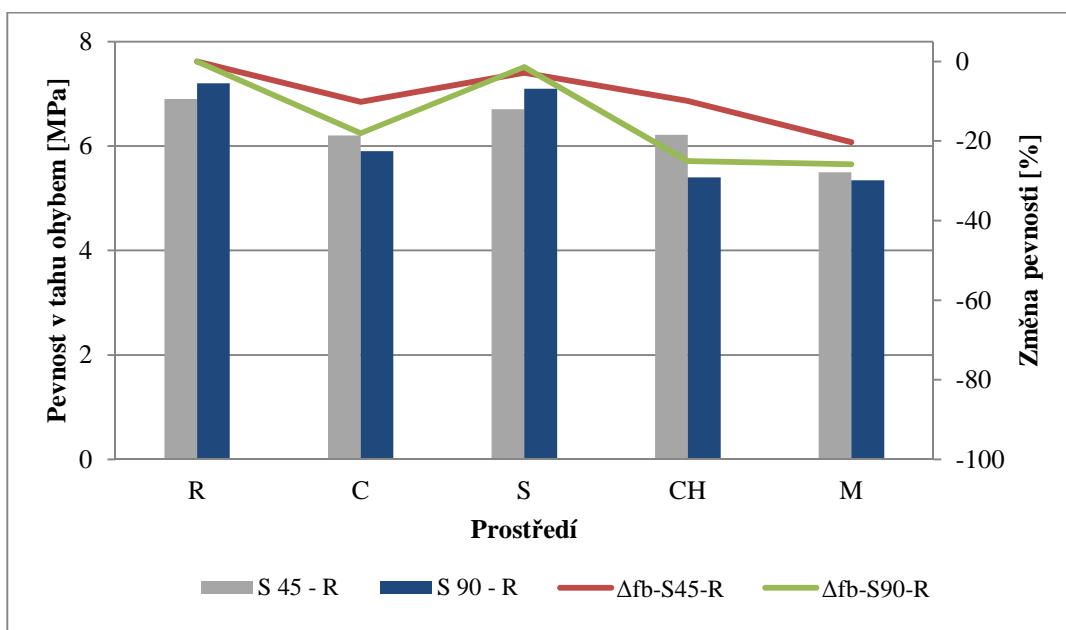
cementového pojiva popínkem. U obou receptur správkových malt je patrný nárůst pevností v tlaku i tahu ohybem závislosti na jejich stáří 28, 45 a 90 dnů. Při porovnání nezatěžovaných referenčních zkušebních těles se zkušebními tělesy, které jsou zatěžovány vysokými teplotami je patrný fakt, že s rostoucí zatěžovací teplotou pevnosti v tlaku i tahu ohybem klesají. U cementových kompozitů s popínkem ve stáří 45 dnů, byl zaznamenán mírný nárůst pevností v tahu ohybem mezi teplotami 400°C a 600°C. Při zatěžování, obou receptur je patrné, že v závislosti s rostoucí zatěžovací teplotou mají objemové hmotnosti mírně klesající tendenci. U správkových malt se struskou ve stáří 28 dnů byl pokles hodnoty pevnosti tlaku mezi 22°C a 1000°C 69 %, u malt ve stáří 45 dnů byl tento pokles 68 % a u malt ve stáří 90 dnů činil pokles 64 %. Z toho vyplývá, že společně s časem dochází ke zlepšení odolnosti vůči vysokým teplotám. Tento fakt je patrný i u správkových malt s popínkem, kde dojde mezi teplotami 22°C a 1000°C ke snížení pevností v tlaku. Ve stáří malt 28 dnů o 71 %, u malt ve stáří 45 dnů byl tento pokles 69 % a u malt ve stáří 90 dnů činil pokles 67 %.

14.1.2 Vliv chemicky agresivního prostředí tepelně nezatížených malt

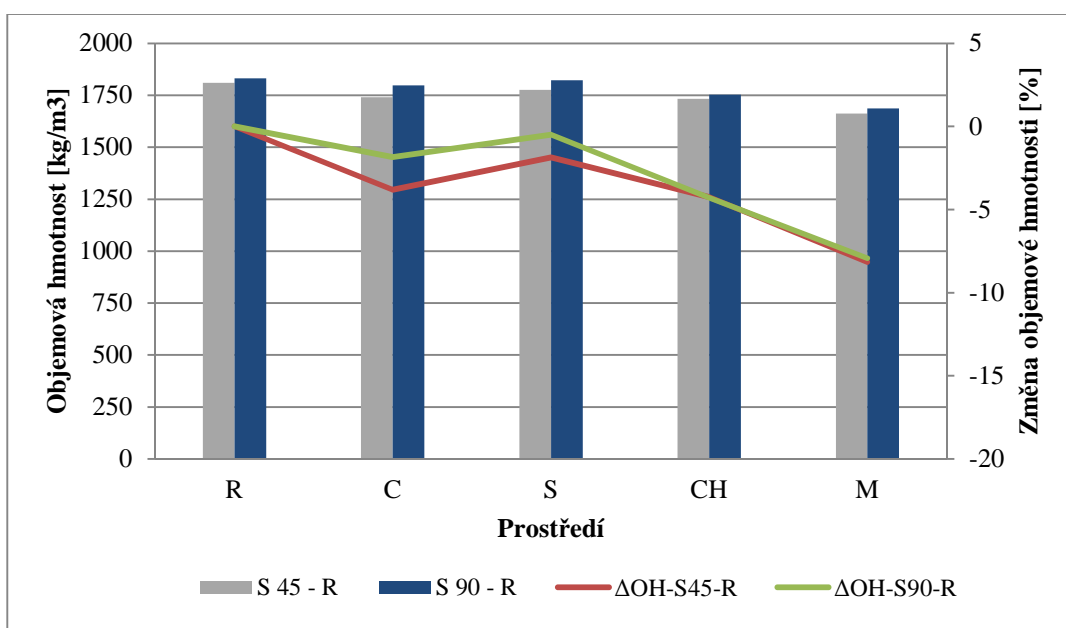
Pro každý graf jsou vytvořeny křivky s plnou čarou, znázorňující procentuální změny parametrů vlivem teploty, které jsou označeny symboly Δf_c , Δf_b a ΔO_H .



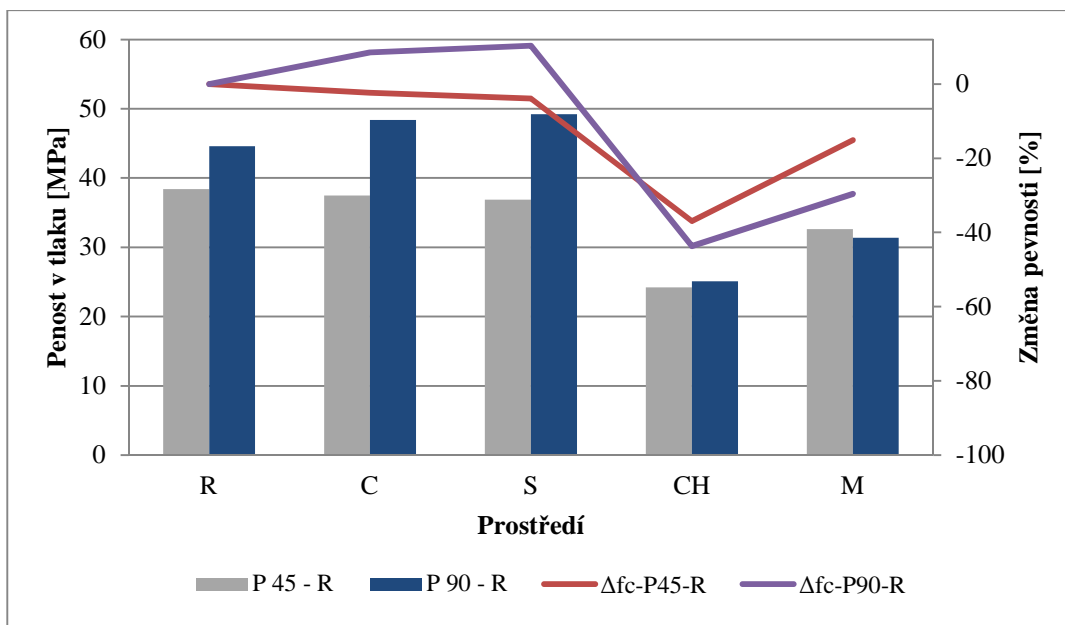
Graf 10: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.



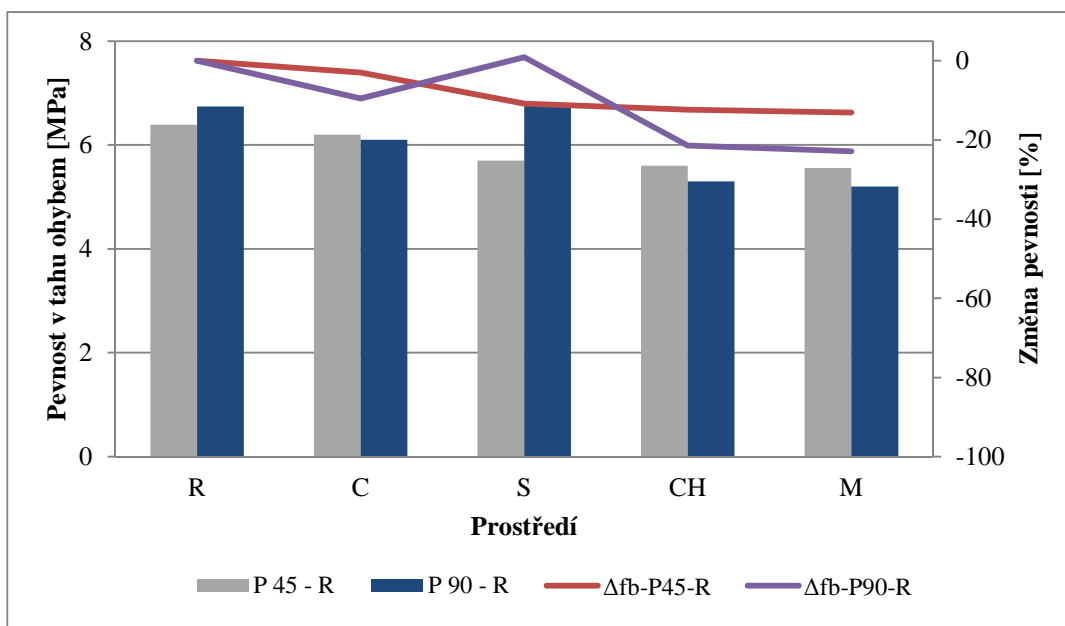
Graf 11: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.



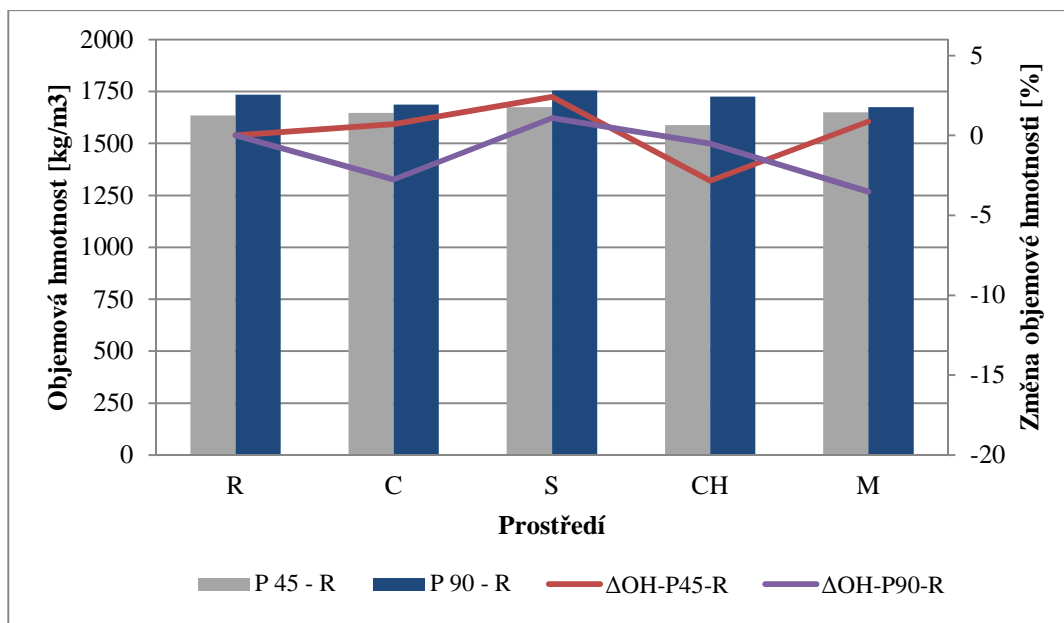
Graf 12: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.



Graf 13: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.



Graf 14: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.



Graf 15: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílků) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.

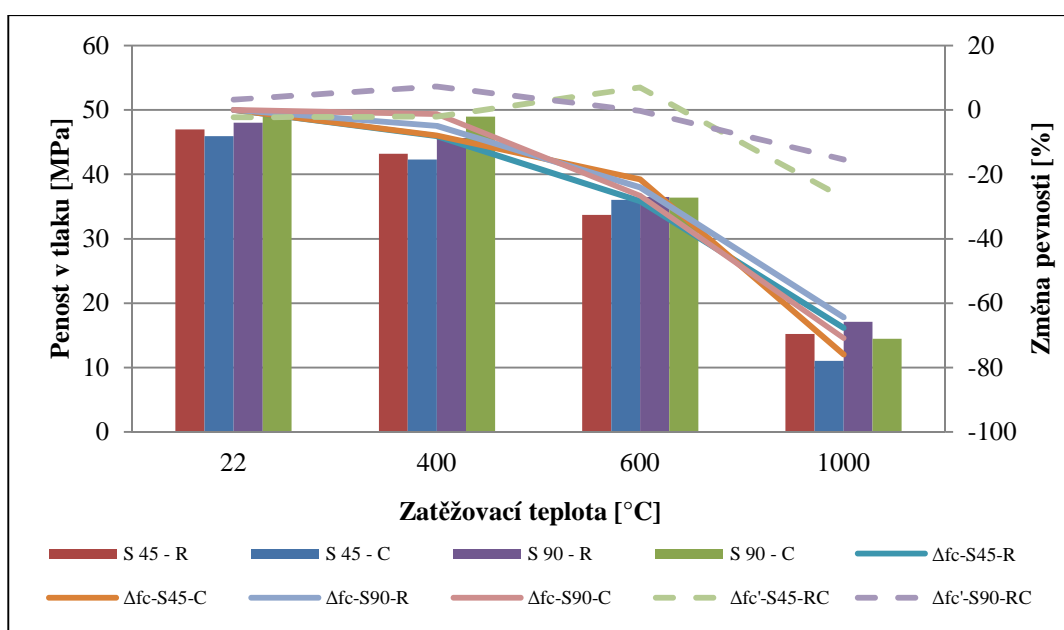
Vyhodnocení působení jednotlivých agresivních prostředí:

U správkových malt s popínkem a struskou je určitá analogie, kdy dochází vlivem zvyšující se doby uložení zkušebních těles v chemicky agresivním prostředí k poklesu mechanických vlastností. Celkově jsou správkové malty s částečnou náhradou cementového pojiva struskou odolnější k působení chemicky agresivního prostředí než správkové malty s částečnou náhradou cementového pojiva popínkem. Prostředí, u kterého došlo ve srovnání s nezatažovanými referenčními maltami k nejvýraznějším poklesům pevností v tlaku i tahu ohybem, bylo prostředí simulující vystavení konstrukce chemicky rozmrazovacím látkám. Druhý nejvýraznější pokles pevností byl pozorován u správkových malt vystavených zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům. Naopak u zkušebních těles, která byla vystavena působení CO_2 a SO_4^{2-} po dobu 90 dní, byl vzhledem k referenčním tělesům zaznamenán určitý nárůst pevností v tlaku, což může být způsobeno vyplněním pórovité struktury produkty karbonatace a sulfatace. Vzhledem k objemovým hmotnostem dochází u těles připravených z cementu a strusky během jejich vystavení agresivním prostředí k jejich poklesu. K nárůstům objemových hmotností dochází u těles vyrobených z cementu a popínku, která byla vystavena agresivnímu prostředí po dobu 45 dní, kromě těles vystavených CHRL. Nárůst objemové hmotnosti u prostředí s CO_2 byl 1 %, u prostředí se sírany 2,5 % a při cyklickém zmrazování a rozmrazování byl nárůst 1 %. U správkových malt s cementem

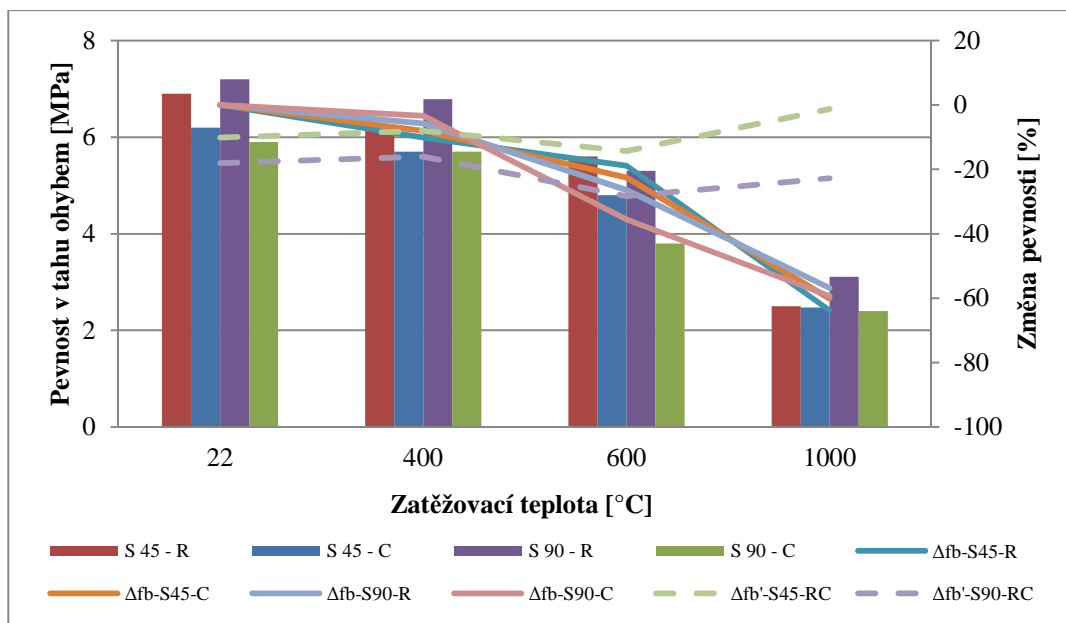
a popílkem ve stáří 90 dní došlo k mírnému zvýšení objemové hmotnosti pouze v případě vystavení těchto malt prostředí se sírany a to o 1 %.

14.1.3 Expozice v chemicky agresivním prostředí s následným teplotním zatížením

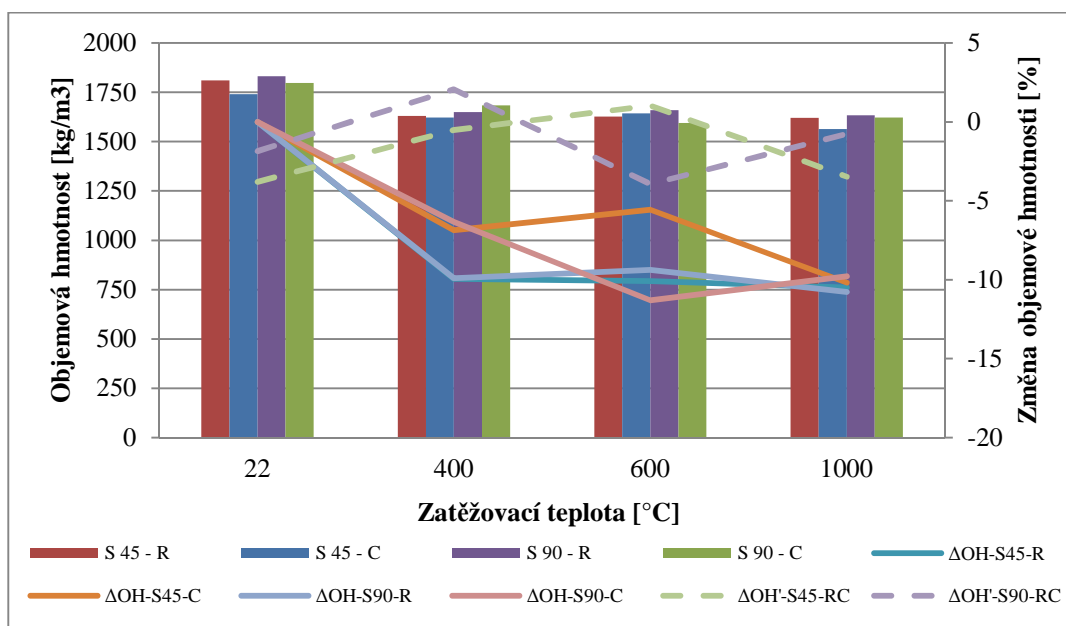
Pro každý graf jsou vytvořeny křivky s plnou čarou, znázorňující procentuální změny parametrů vlivem teploty, které jsou označeny symboly Δf_c , Δf_b a ΔOH . Křivky, které jsou znázorněny čerchovanou čarou a jsou označeny symboly Δf_c , Δf_b a $\Delta OH'$ znázorňují procentuální změny parametrů vlivem agresivního prostředí při dané teplotě.



Graf 16: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení CO_2 .



Graf 17: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení CO_2 .

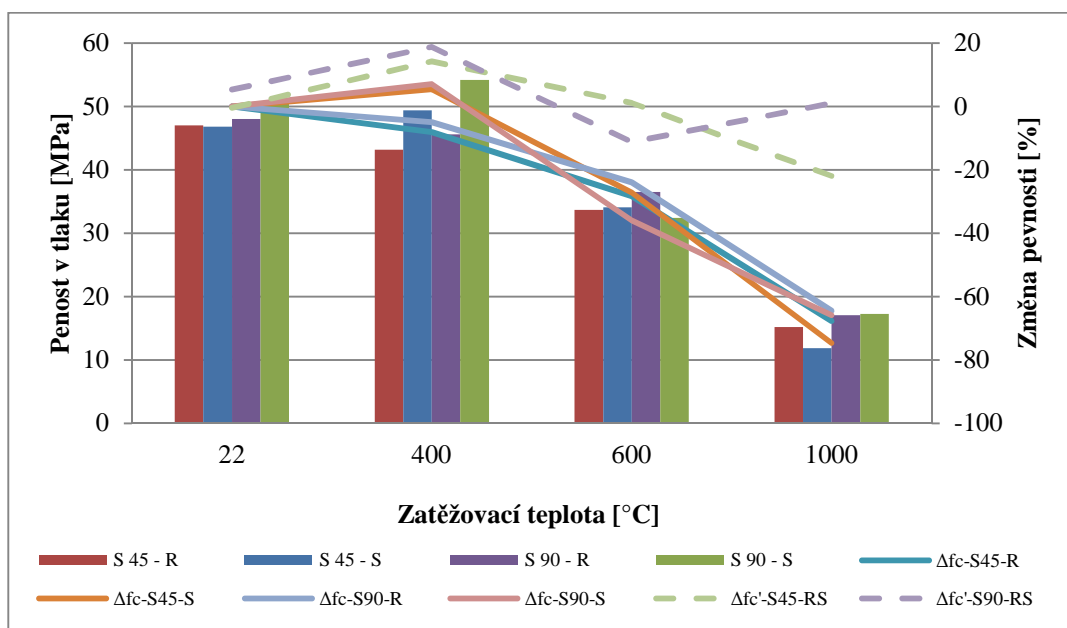


Graf 18: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení CO_2 .

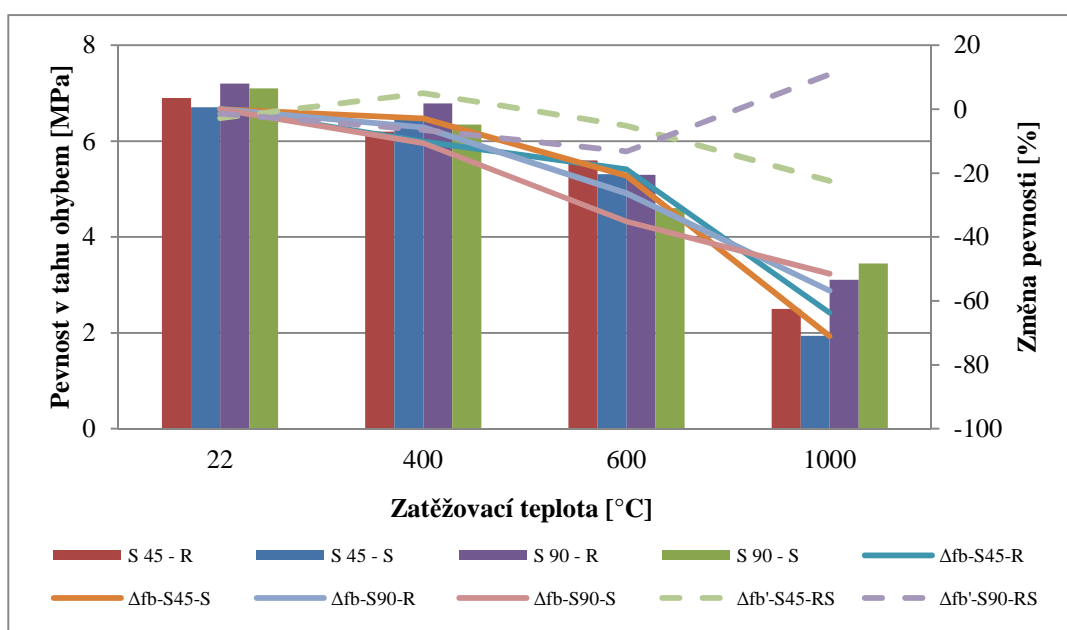
Vyhodnocení působení oxidu uhličitého na správkové malty:

Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených CO_2 , v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto

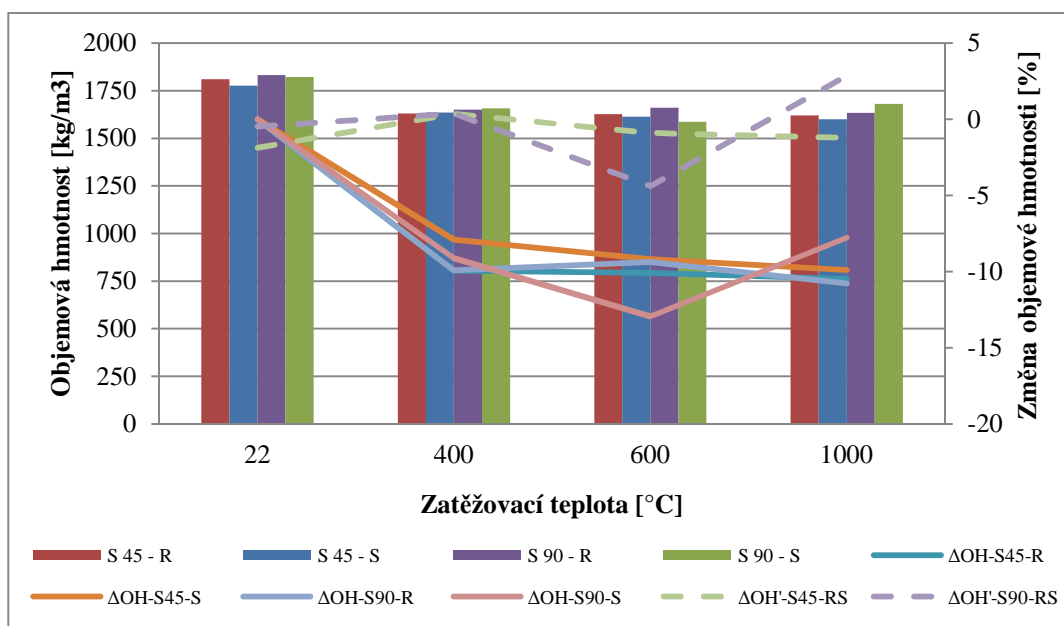
prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 76 %, resp. 71 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatížených CO₂ a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 2 % a u 9 denního uložení 3 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými CO₂ a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 27 %, u 90denního uložení 15 %.



Graf 19: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení SO_4^{2-} .



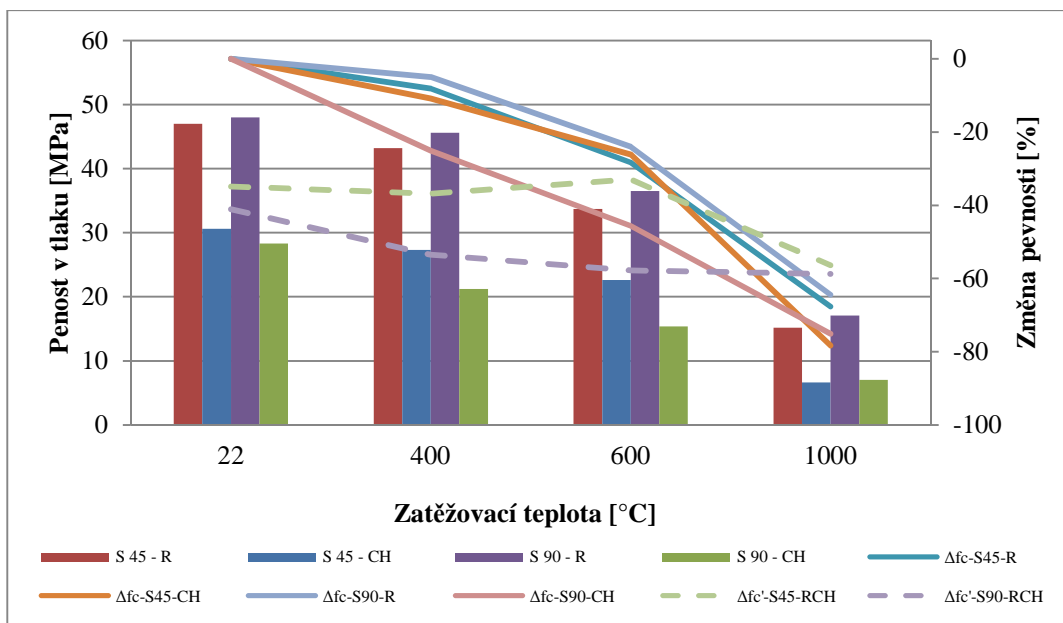
Graf 20: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení SO_4^{2-} .



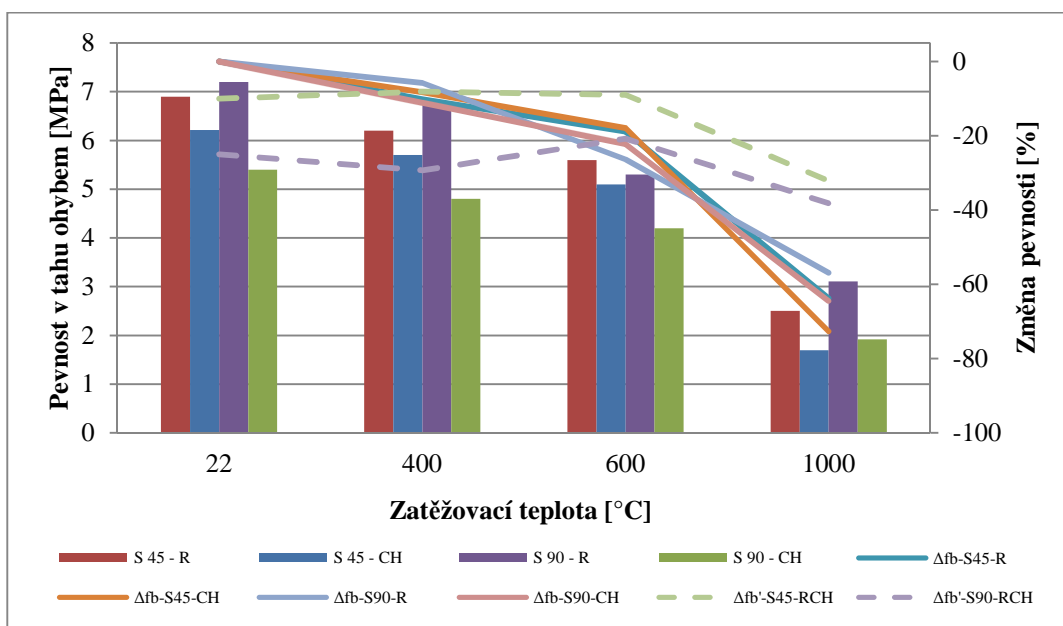
Graf 21: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení SO_4^{2-} .

Vyhodnocení působení roztoku síranů na správkové malty:

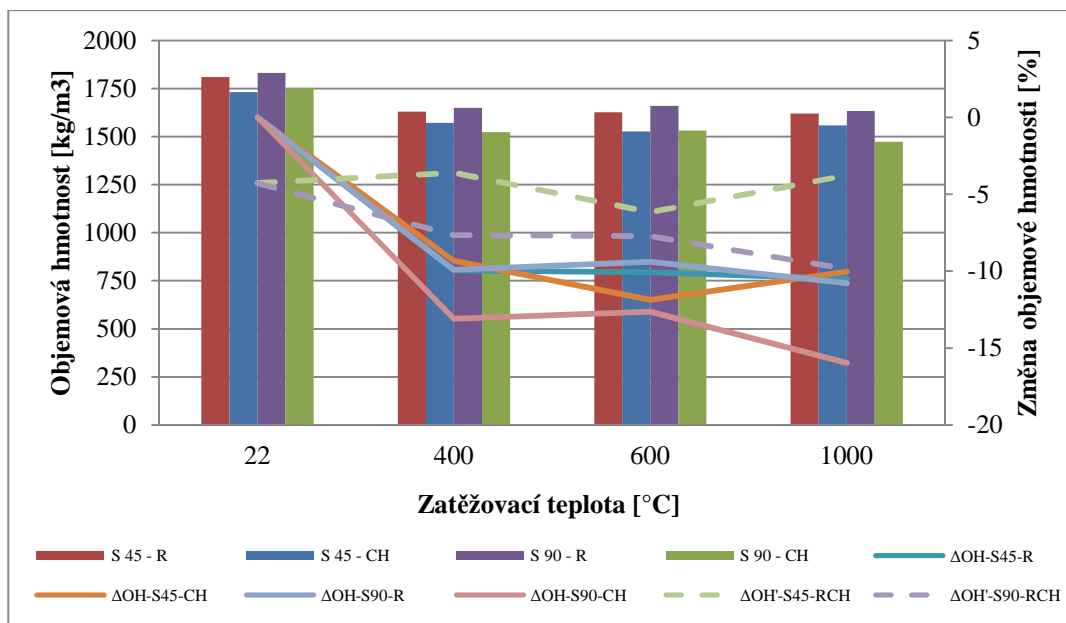
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených SO_4^{2-} v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 71 %, resp. 51,5 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatížených SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 0,5 %. Naopak nárůst pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatížených SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 90denního uložení 5,5 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 22 %. Nárůst pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 90denního uložení 5 %.



Graf 22: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.



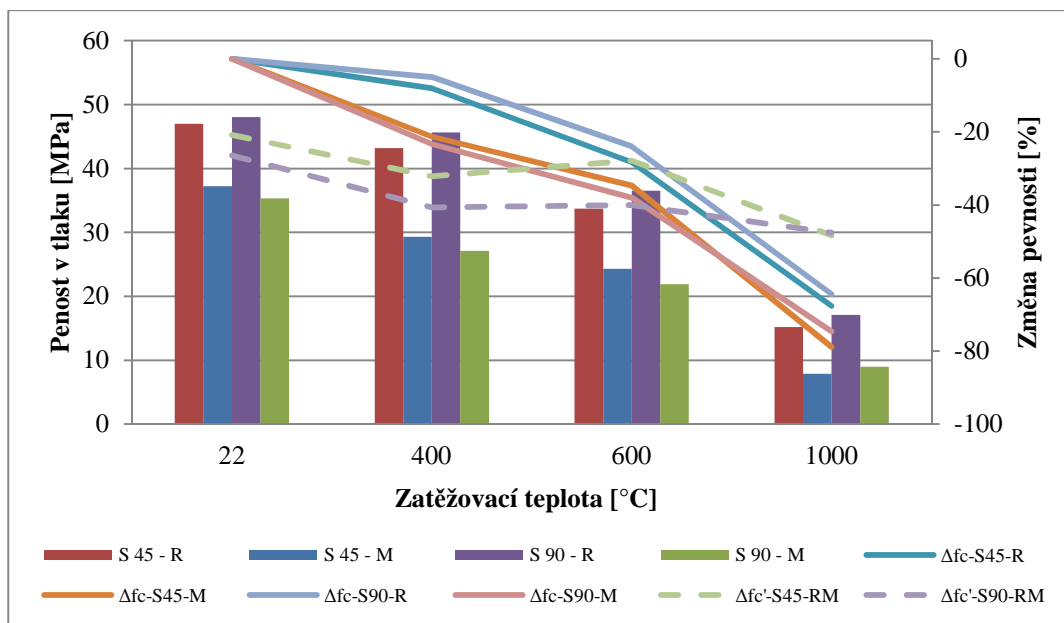
Graf 23: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.



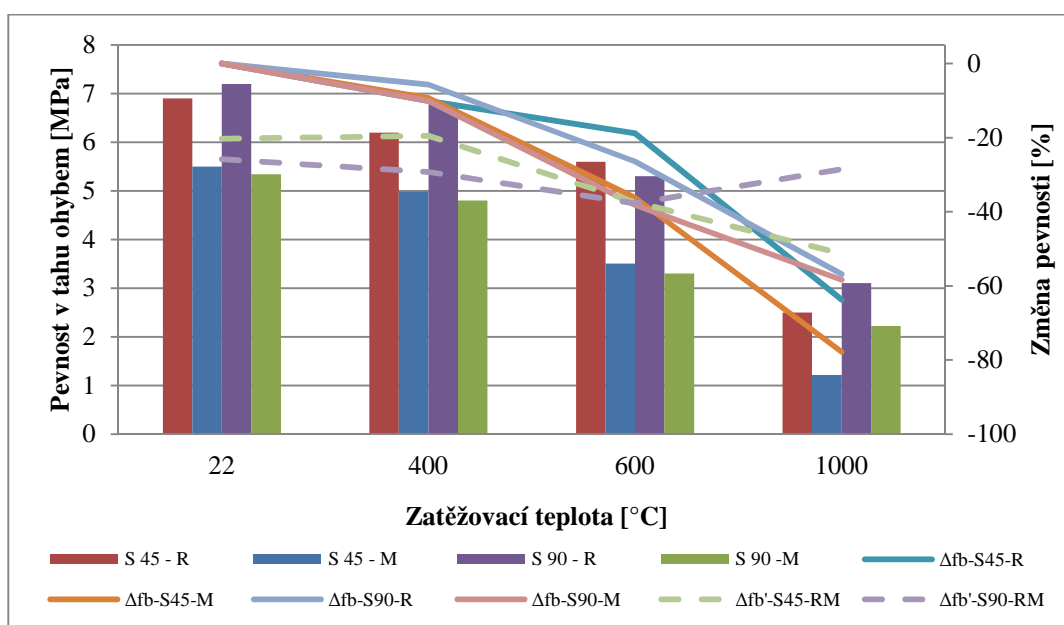
Graf 24: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.

Vyhodnocení působení chemicky rozmrazovacích látek na správkové malty:

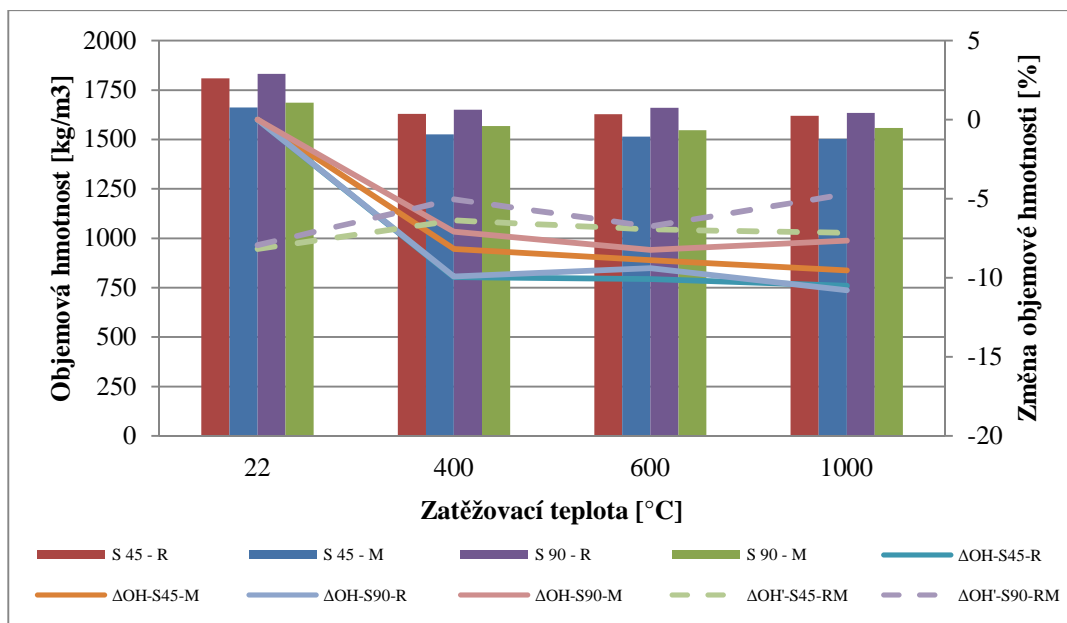
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených chemicky rozmrazovacími látkami v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 78 %, resp. 75 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatíženými CHRL a tělesy referenčními bez zatížení je u 45denního uložení 35 % a u 90denního uložení 41 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými CHRL a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 56 %, u 90denního uložení 59 %.



Graf 25: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.



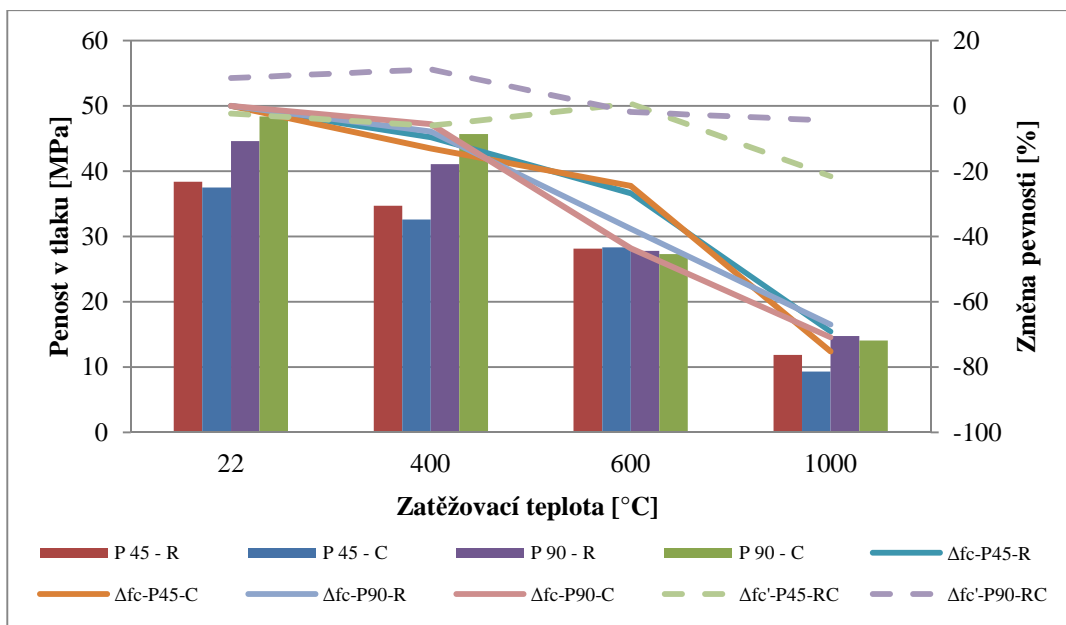
Graf 26: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.



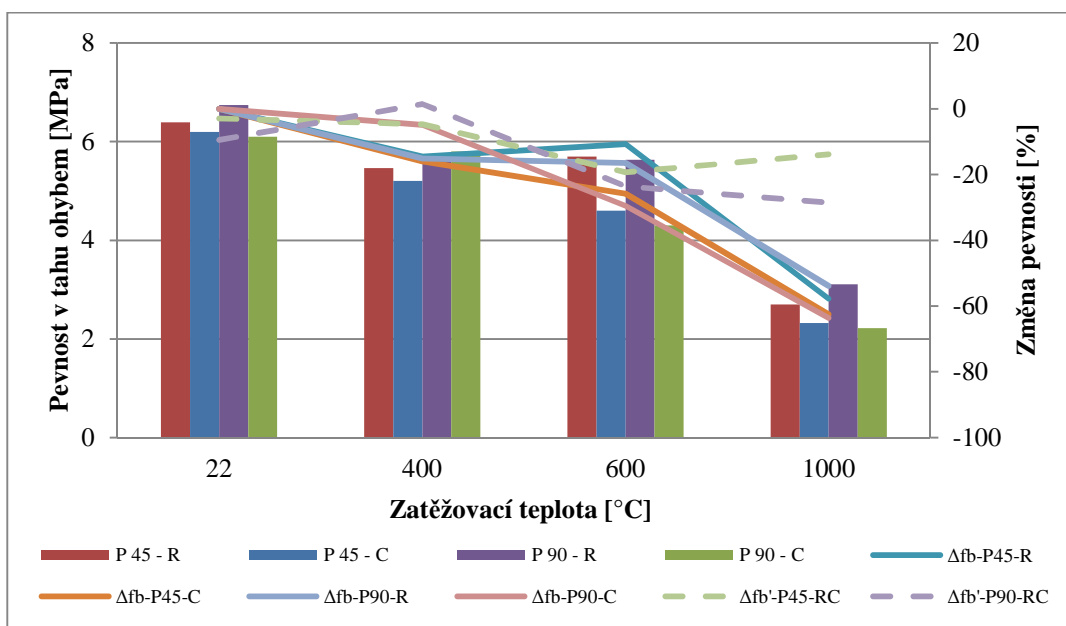
Graf 27: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.

Vyhodnocení působení cyklického zmrazování a rozmrazování na správkové malty:

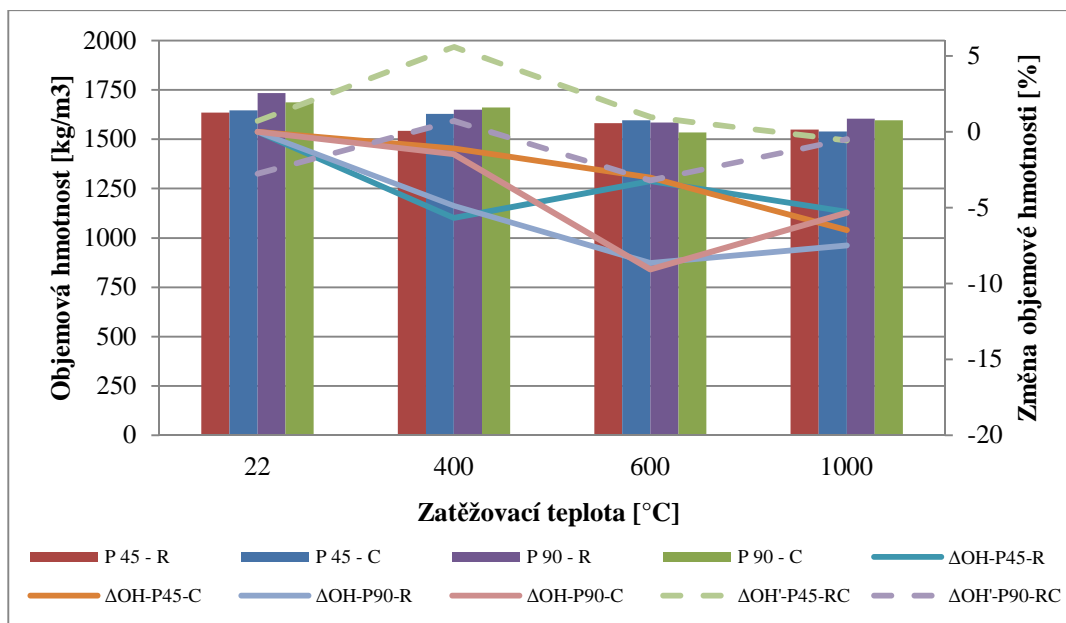
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených zmrazovacími cykly, v závislosti na rostoucí teplotě, se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 79 %, resp. 75 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatížených zmrazovacími cykly a tělesy referenčními bez zatížení je u 45denního uložení 21 % a u 90denního uložení 26,5 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými zmrazovacími cykly a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 48 %, u 90denního uložení 59 %.



Graf 28: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení CO_2 .



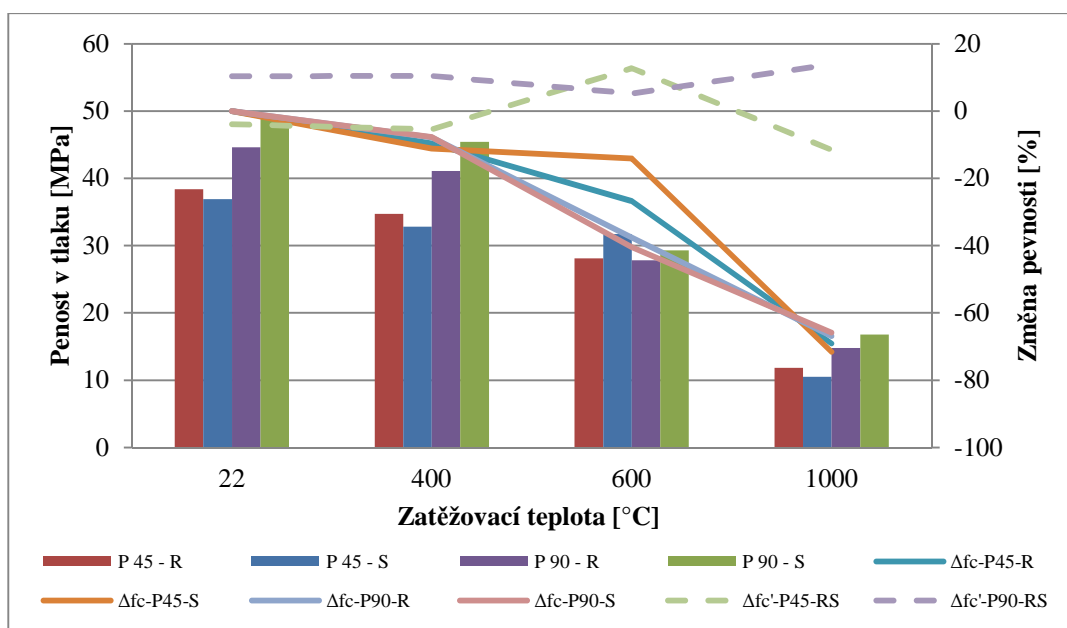
Graf 29: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení CO_2 .



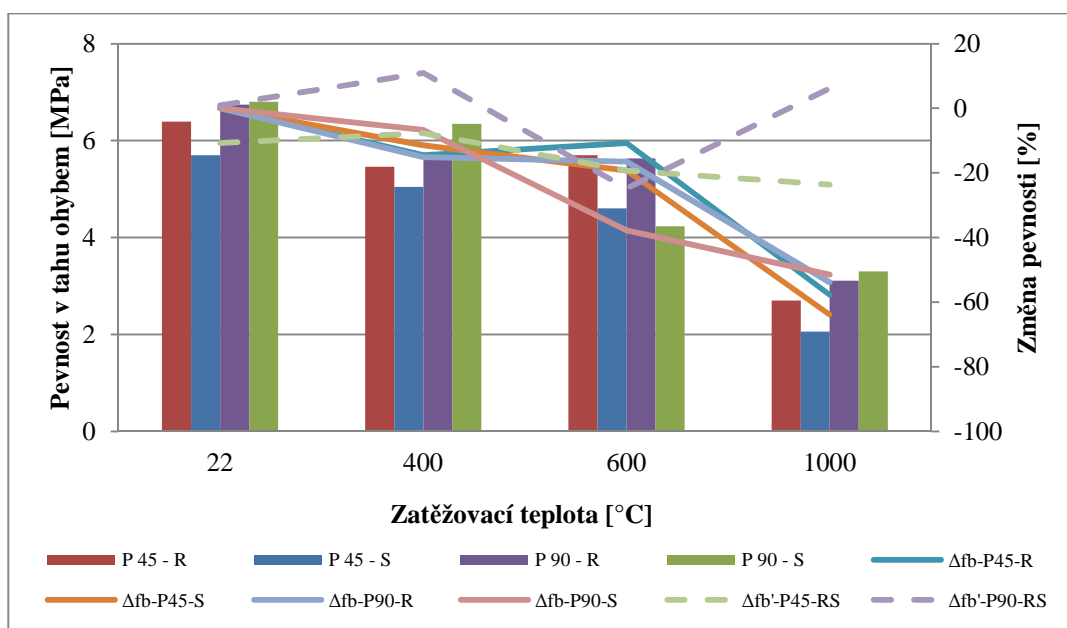
Graf 30: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení CO_2 .

Vyhodnocení působení oxidu uhličitého na správkové malty:

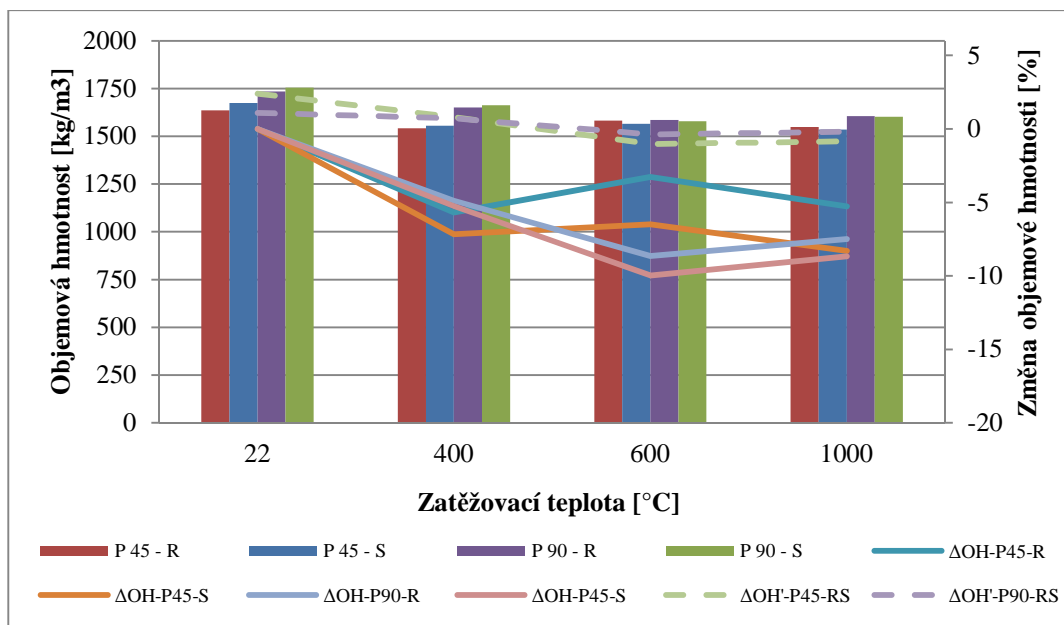
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených CO_2 v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 75 %, resp. 71 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatíženými CO_2 a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 2 % a u 90denního uložení 8,5 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými CO_2 a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 22 %, u 90denního uložení 4,5 %.



Graf 31: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení SO_4^{2-} .



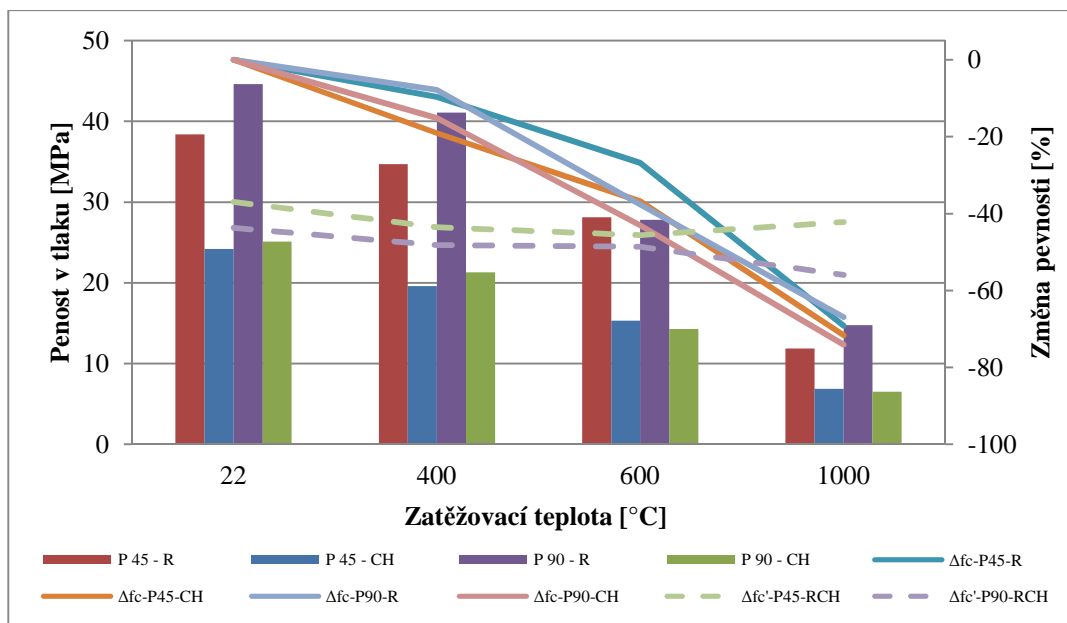
Graf 32: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení SO_4^{2-} .



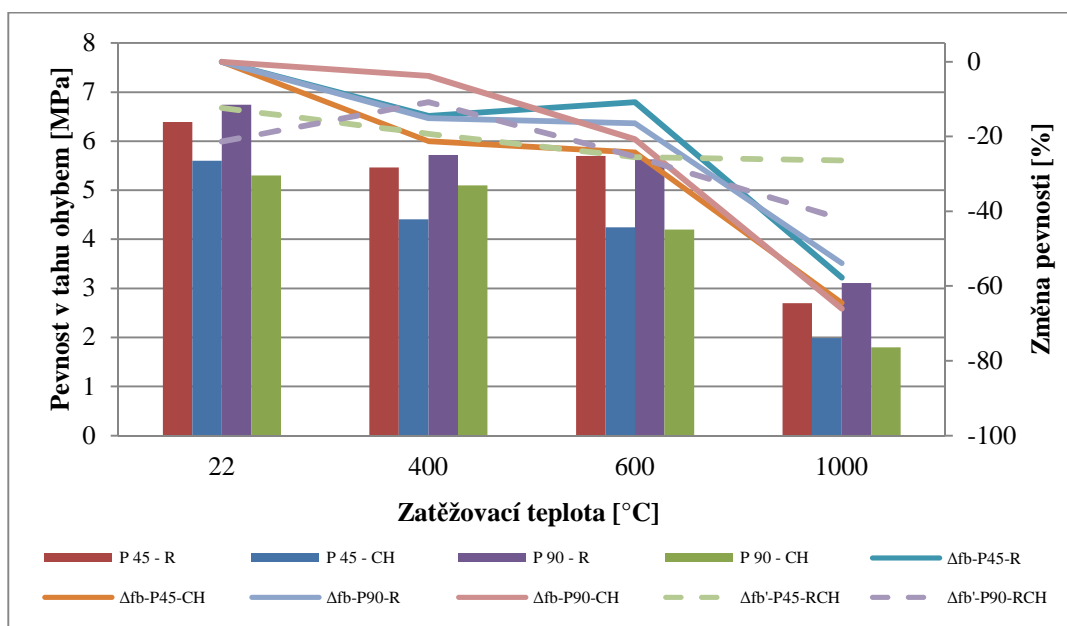
Graf 33: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení SO_4^{2-} .

Vyhodnocení působení roztoku síranů na správkové malty:

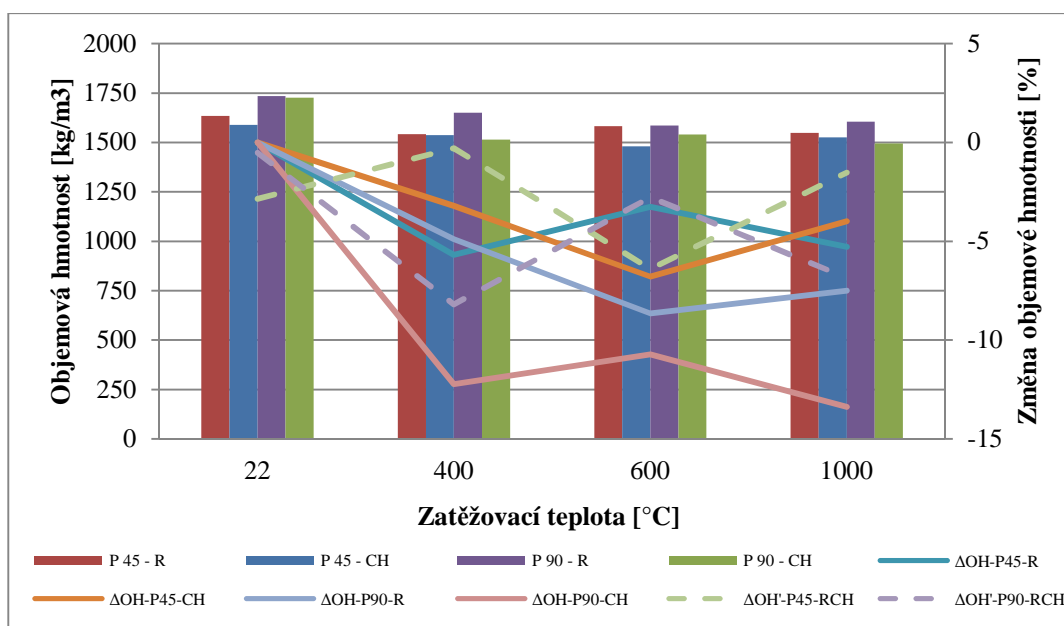
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených SO_4^{2-} v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 72 %, resp. 66 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatížených SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 4 %. Naopak nárůst pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatížených SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 90denního uložení 10 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 12 %. Nárůst pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými SO_4^{2-} a tělesy referenčními bez zatížení byl u 90denního uložení 14 %.



Graf 34: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.



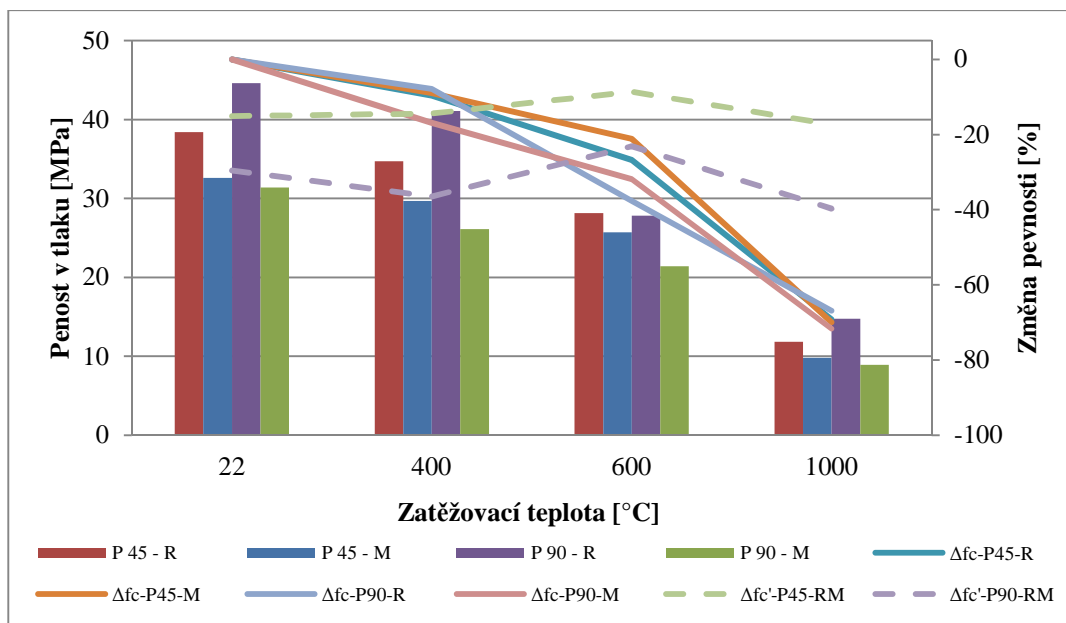
Graf 35: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.



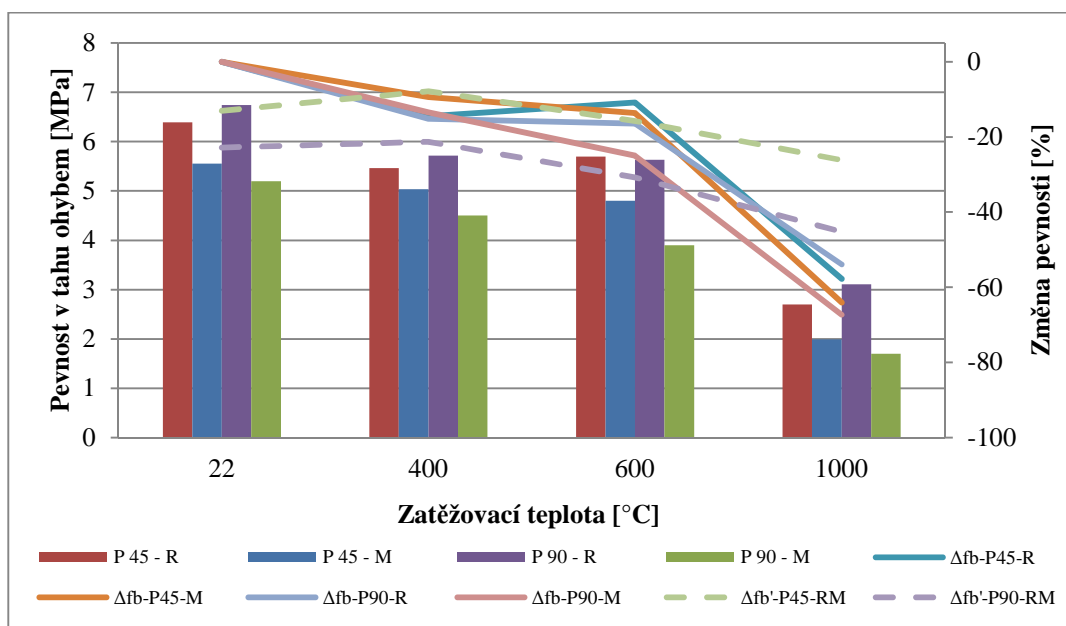
Graf 36: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.

Vyhodnocení působení chemicky rozmrazovacích látek na správkové malty:

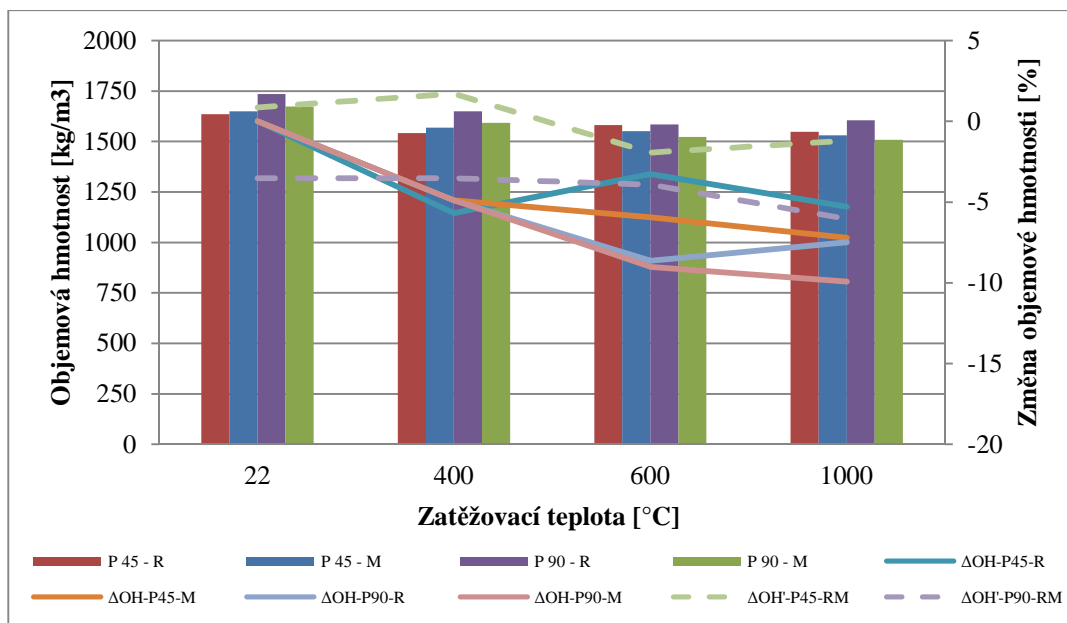
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených chemicky rozmrazovacími látkami v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 72 %, resp. 74 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatíženými CHRL a tělesy referenčními bez zatížení je u 45denního uložení 37 % a u 90denního uložení 44 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými CHRL a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 42 %, u 90denního uložení 56 %.



Graf 37: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.



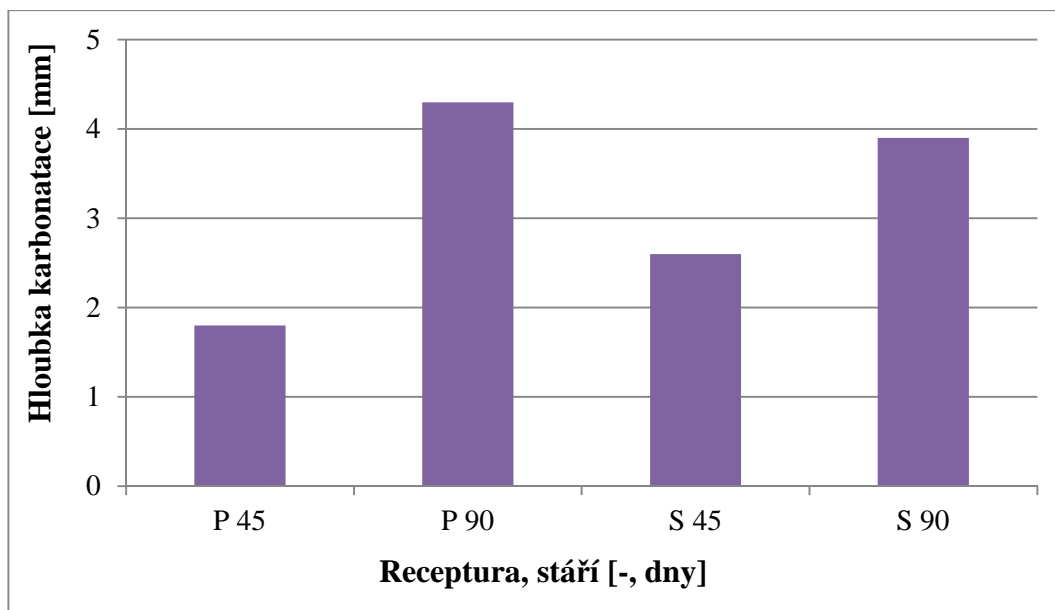
Graf 38: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.



Graf 39: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.

Vyhodnocení působení cyklického zmrazování a rozmrazování na správkové malty:

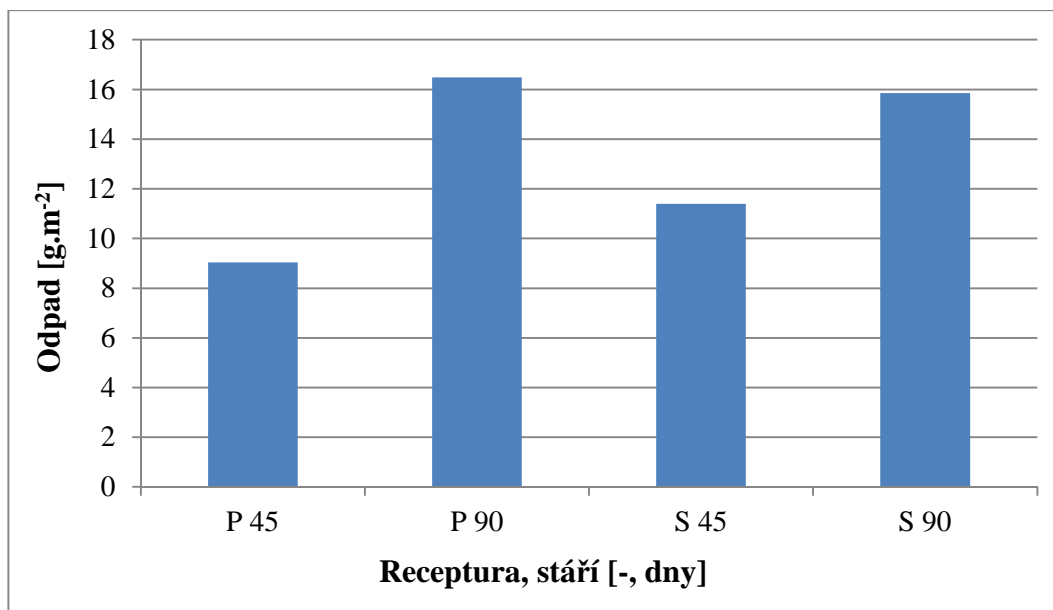
Mechanické vlastnosti správkových malt zatížených chemicky rozmrazovacími látkami v závislosti na rostoucí teplotě se snižují. Pokles pevnosti v tlaku u 45denního uložení zkušebních těles v tomto prostředí mezi teplotou 22°C a 1000°C byl 70 %, resp. 72 % u 90denního uložení. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 22°C mezi tělesy zatíženými CHRL a tělesy referenčními bez zatížení je u 45denního uložení 15 % a u 90denního uložení 30 %. Pokles pevnosti v tlaku při teplotě 1000°C mezi tělesy zatíženými zmrazovacími cykly a tělesy referenčními bez zatížení byl u 45denního uložení 17 %, u 90denního uložení 40 %.



Graf 40: Porovnání vlivu působení CO_2 .

Vyhodnocení hloubky karbonatce:

Hloubka karbonatce u zkušebních těles vyrobených z cementu a strusky a vystavených působení agresivního prostředí CO_2 po dobu 45 dnů byla 2,6 mm. Po 90 dnech expozice poté tato hodnota hloubky karbonatce zkoušených správkových malt vzrostla na 3,9 mm. Hloubka karbonatce u zkušebních těles, vyrobených z cementu a popílku a vystavených působení agresivního prostředí CO_2 po dobu 45 dnů byla 1,8 mm. Po 90 dnech expozice následně tato hodnota hloubky karbonatce zkoušených správkových malt vzrostla na 4,3 mm.



Graf 41: Porovnání vlivu působení chemicky rozmrazovacích látek.

Vyhodnocení množství odpadu vzniklého při působení chemicky rozmrazovacích látek:

Množství odpadu ze zkušebních těles, vyrobených z cementu a strusky, vystavených působení agresivního prostředí NaCl, při stáří vzorků 45 dnů bylo po 25 cyklech 11,40 g/m². Při stáří vzorků 90 dnů poté tato hodnota množství odpadu zkoušených správkových malt vzrostla po 25 cyklech na 15,85 g/m². Množství odpadu ze zkušebních těles, vyrobených z cementu a popílku, vystavených působení agresivního prostředí NaCl, při stáří vzorků 45 dnů bylo po 25 cyklech 9,04 g/m². Při stáří vzorků 90 dnů následně tato hodnota množství odpadu zkoušených správkových malt vzrostla po 25 cyklech na 16,48 g/m².

14.2 Fyzikálně-chemické analýzy

Vyhodnocení XRD analýz:

Níže jsou uvedeny výsledky XRD analýz, kde jsou zmíněny pouze vzorky, u kterých došlo k výraznějším změnám mineralogického složení.

U první receptury s CEM I 42,5R a struskou byl v mikrostruktuře vzorků po 45denním uložení v agresivním prostředí CO₂ při teplotě 22°C identifikován vznik korozních novotvarů portlanditu a SiO₂. Po 90denním uložení v agresivním prostředí CO₂ byl identifikován pouze SiO₂. Po tepelném zatížení vzorků 1000°C byli v mikrostruktuře vzorků identifikovány SiO₂, CaO a NaO. U první receptury s CEM I 42,5R a struskou byl v

mikrostruktury vzorků po 45denním uložení v agresivním prostředí síranů při teplotě 22°C identifikován vznik korozních novotvarů portlanditu a SiO_2 . Po 90denním uložení v agresivním prostředí síranů identifikován pouze SiO_2 . Po tepelném zatížení vzorků 1000°C byli v mikrostruktury vzorků identifikovány SiO_2 , CaO a NaO.

U druhé receptury s CEM I 42,5R a popílkem byl v mikrostruktury vzorků po 45denním uložení v agresivním prostředí CO_2 při teplotě 22°C identifikován vznik korozních novotvarů portlanditu a SiO_2 . Po tepelném zatížení vzorků 1000°C byl v mikrostruktury vzorků identifikován pouze SiO_2 . U druhé receptury s CEM I 42,5R a popílkem byl v mikrostruktury vzorků po 45denním uložení v agresivním prostředí síranů při teplotě 22°C identifikován vznik korozních novotvarů SiO_2 . Při teplotě 1000°C byl v mikrostruktury vzorků identifikován opět SiO_2 .

Po 90 dnech expozice v agresivním prostředí nebyl XRD analýzou zjištěn vznik korozních novotvarů ettringitu. Korozní novotvary byly detekovány pouze mikroskopem. Z XRD analýzy je patrný rozklad uhličitanů při tepelném zatížení 1000°C. Při zahřívání amfibolitického kameniva dochází k rozkladu živců. Dále je patrný pokles množství Ca(OH)_2 vlivem pucolánové reakce u vzorků s obsahem popílku a latentně hydraulické reakce u vzorků s obsahem strusky. Samotná analýza byla ovlivněna přítomností použitého kameniva. Pro přesnější určení vznikajících korozních novotvarů v mikrostruktury správkových malt s obsahem popílku nebo strusky bych navrhoval delší dobu expozice zkušebních těles v agresivních prostředích.

Závěr

V práci byly shrnuty informace, o správkových maltách s částečnou náhradou cementového pojiva pomocí využití vysokopecní strusky nebo elektrárenského popílku. Je zde popsána jejich trvanlivost vzhledem k působení agresivních prostředí a účinkům vysokých teplot. Dále byly shrnuty možné vlivy okolního prostředí a vysokých teplot vznikajících během požáru na trvanlivost správkových malt. Jsou zde popsány děje probíhající v železobetonových konstrukcích vystavených vlivům chemicky agresivního prostředí a vysokých teplot.

Vývojem správkových malt se věnuje mnoho zahraničních týmů, které poukazují na možnosti využití alternativních surovin, které by mohly snížit množství cementového pojiva. Jedním ze směrů vývoje správkových malt jsou hmoty na bázi geopolymérů, díky kterým by mohlo dojít ke snížení výroby cementu. Snížení produkce cementu by mohla pozitivně přispět ke zlepšení životního prostředí v podobě snížení množství oxidu uhličitého vzniklého při jeho výrobě. Vývoj sanačních malt se také zabývá využitím různých druhů lehčených kameniv, jako jsou perlit a vermikulit.

Shrnutím poznatků v oblasti vývoje správkových malt s odolností vůči agresivnímu prostředí a vysokým teplotám lze konstatovat, že jako výhodné se jeví použití kameniv, které již podlehly tepelnému zatížení při jejich vlastní výrobě. Při výběru kameniva je důležité přihlížet i k jejich ekonomickému aspektu. V tomto případě se jako vhodné jeví využití dostupných alternativních surovin, díky kterým by mohlo dojít ke snížení výrobních nákladů. Jako vhodnou kombinaci kameniv, které vzájemně kompenzují své nedostatky, by mohla být kombinace popílkového agloporitu s amfibolitem. Pozitivní vliv byl prokázán i při použití polypropylenových vláken, jejichž hlavní funkcí je snížení tlaku vodní páry v mikrostruktuře správkové malty během požáru, kdy tato vlákna vyhoří a vytvoří tak prostory, do kterých může expandovat vodní pára. Snižuje to riziko vzniku explozivního odprýskávání malty při jejím vystavení vysokým teplotám. Vzhledem k výsledkům trvanlivosti správkových malt s částečnou náhradou cementového pojiva pomocí strusky nebo popílku vůči působení chemicky agresivních prostředí i proti působení vysokých teplot vykazovaly vyšší odolnosti správkové malty vyrobené se struskou.

V této práci byly navrženy a testovány dva typy správkových malt, které lze na základě porovnání dosažených výsledků se základními požadovanými parametry

správkových hmot zařadit do tříd se statickou funkcí. Správkové malty s obsahem strusky byly zařazeny do třídy R4. A správkové malty s obsahem popílku byly zařazeny do třídy R3.

Ekonomické hledisko výroby této vyvinuté správkové malty úzce souvisí s hlediskem ekologickým, kde je využíváno vedlejších energetických a hutních produktů pro snížení množství cementu při současném zachování mechanických vlastností takto vyrobených malt.

Ekologický aspekt výroby těchto správkových malt zahrnuje jednak využití lehčeného kameniva agloporitu, které je vyráběno z alternativních surovin, ale také možnost částečné náhrady cementového pojiva struskou nebo popílkem, díky kterým je snížena produkce oxidu uhličitého během výroby cementu.

Pro získání dalších výsledků a objasnění podstatných souvislostí bude nutné pokračovat ve sledování těchto správkových malt v delším časovém úseku v dalších agresivních prostředích o různých koncentracích, ale také v provedení zkoušek ostatních parametrů mechanických vlastností, jako jsou zkoušky pružnosti nebo zkoušky soudržnosti s podkladem, tepelné slučitelnosti atd.. Také by bylo vhodné rozšířit studium správkových malt o soubor fyzikálně-chemických a mikrostrukturálních analýz, které by nejen potvrdily výskyt novotvarů, ale zároveň by určili jejich případné množství. Další variantou pro následný výzkum by mohlo být i zatěžování zkušebních těles bez předešlého vysoušení v sušárně, díky kterému bylo sníženo riziko vzniku trhlinek či odprýskávání povrchových vrstev správkových malt vlivem snížení obsažené vlhkosti. Navazující výzkum z hlediska případné optimalizace receptur by mohl být v podobě přidání metakaolinu nebo změny druhu kameniva, které by splňovalo podmínku dostatečné odolnosti vůči vysokým teplotám při zachování jejich pevností. Správkové malty jako takové skýtají určitý prostor pro využití alternativních surovin bez ohledu na to, zdali je jedná o hmoty s odolností vůči vysokým teplotám nebo agresivnímu prostředí.

Literatura

- [1] DROCHYTKA, R., DOHNÁLEK, J., BYDŽOVSKÝ, J., PUMPR, V., DUFKA, A., DOHNÁLEK, P., *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III*. Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012. ISBN 978-80-260-2210-7. (CS).
- [2] BYDŽOVSKÝ, J., *Technologie sanace*, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební v Brně, 2007.
- [3] DROCHYTKA, R., *Trvanlivost stavebních materiálů*, CJ07. Studijní opory pro studijní program stavební inženýrství. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební 2007.
- [4] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P., *Lehké stavební látky*, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební 2006.
- [5] PYTLÍK, P., *Technologie betonu*. VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [6] PYTLÍK, P., *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [7] MATOUŠEK, Milan. DROCHYTKA, Rostislav. *Atmosférická koroze betonu*. Vyd. 1. Praha: IKAS, 1998, 171 s. ISBN 80-902-5580-9.
- [8] TENZER, Tomáš. *Studium trvanlivosti samozhutnitelných betonů*, Diplomová práce, VUT FAST, Brno 2006.
- [9] DOBRÝ, Oldřich. PÁLEK, Ladislav. *Koroze betonu ve stavební praxi*, STNL Praha 1988.
- 54
- [10] DORAZILOVÁ, Irena. BODNÁROVÁ, Lenka. SEDLÁK, Petr. HORÁK, Ota. VÁLEK, Jaroslav. *Vlastnosti betonů s green cementy*. 18. Konference betonářské dny, 2011.
- [11] PIPILIKAKI, P., M. KATSIOTI a J.L. GALLIAS. Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment. *Construction and Building Materials*. 2009, roč. 23, č. 2, s. 1042-1049. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808001219>
- [12] SAHMARAN, M., T.K. ERDEM a I.O. YAMAN. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting?drying and heating?cooling environments. *Construction*

- and *Building Materials*. 2007, roč. 21, č. 8, s. 1771-1778. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061806001772>
- [13] *Vlastnosti portlandských cementů směsných*. [online]. 2005, s. 12 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/vlastnosti_portlandskych_cementu_smesnych.pdf
- [14] POČEKALLO, V., *Vlastnosti cementových kompozitních materiálů s plazmatem upravenými polypropylenovými vlákny*, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2013.
- [15] ANAGNOSTOU, G., EHRBAR, H., *WorldTunnelCongress 2013 Geneva Underground – the way to the future!*, Taylor & Francis Group, London 2013. ISBN 978-1-138-00094-0.
- [16] ŠOTTL, J., *Vývoj správkové malty s odolností proti vysokým teplotám*, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2014.
- [17] PYTLÍK, P., *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 1998.

Odborné články

- [18] F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, A.F. Camões, M. Jamshidi, Y. Ding., *Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue?*. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [19] Idawati Ismail, Susan A. Bernal, John L. Provis, Rackel San Nicolas, David G. Brice, Adam R. Kilcullen, Sinin Hamdan, Jannie S.J. van Deventer., *Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes*. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [20] N.K. Lee, J.G. Jang, H.K. Lee., *Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages*. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [21] J.I. Escalante-Garcia, P. Castro-Borges, A. Gorokhovskiy, F.J. Rodriguez-Varela., *Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: Effect of temperature and alkali concentration*. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>
- [22] Zhu Pan, Jay G. Sanjayan, Daniel L.Y. Kong., *Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures*. Dostupný z: <<http://www.sciencedirect.com>>

- [23] Wei-Chien Wang, Her-Yung Wang, Ming-Hung Lo., The engineering properties of alkali-activated slag pastes exposed to high temperatures. Dostupný z:
<http://www.sciencedirect.com>>
- [24] Semiha Akcaozog˘lu, Cuneyt Ulu., Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. Dostupný z:
<http://www.sciencedirect.com>
- [25] Vít Černý, David Procházka, Tomáš Melichar., Variabilita vlastností různých druhů popílků
- [26] LACH, Vladimír; DAŇKOVÁ, Marcela. *Mikrostruktura stavebních látek*. 2. vydání. Brno: VUT, 178s.

Normy

- [27] ČSN EN 12390-5 Pevnost v tahu ohybem – zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles, 2009.
- [28] ČSE EN 12190-3 Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt, 2009.
- [29] ČSN EN 12395 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení odolnosti proti karbonataci, 2005.
- [30] ČSN 73 1326, ZMĚNA Z1 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, 2003.
- [31] ČSN 73 1322, ZMĚNA Z1 Stanovení mrazuvzdornosti betonu, 2003.
- [32] ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky, Český normalizační institut 2000
- [33] ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010

Internet

- [34]
http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/baleny_cement/index.htm
- [35] <http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/A23DE9C7-2D6D-4BCE-96BD-8609901F6B81/0/ProduktovylistProduktovylistBalencementy.pdf>
- [36] http://www.kotouc.cz/produkt_struska.php

- [37] <http://www.cezep.cz/popilek.html?id=123>
- [38] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/uhelné-elektrárny/cr/tusimice.html>
- [39] <http://www.radka.cz/cs/produkty/vinnapas-5043-n/>
- [40] <http://www.silicium.de/>
- [41] <http://www.cluz.cz/cz/metakaoliny-obecné-informace>
- [42] <http://www.kamenzbraslav.cz/cs/tezba-kamene/kamenolom-zelesice/>
- [43] http://www.krampeharex.com/cz/vlakna/pouiti_vlaken/poarni_ochrana.htm
- [44] <http://www.multiform.co.nz/Producer%20Statement.pdf>
- [45] <http://www.chemius.co.kr/en/proudct/UltraFiber-500.php>
- [46] <http://www.avrconcrete.com/buckeye.aspx>
- [47] <http://www.pozarniodolnost.cz>
- [48] <http://www.betontks.cz>
- [49] <http://www.tvstav.cz>
- [50] <http://www.tescan.com/cz/produkty/mira-feg-sem/mira3-lm>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Požadavky na požární bezpečnost vzhledem k betonu. [48]</i>	23
<i>Tabulka 2: Tři hlavní kritéria požární ochrany podle Eurokódu 2, části 1-2. [48]</i>	24
<i>Tabulka 3: Stupně požární bezpečnosti. [17]</i>	26
<i>Tabulka 4: Přehled vlastností polypropylenových vláken.</i>	63
<i>Tabulka 5: Přehled vlastností rozptýlené výztuže na bázi celulózy.</i>	63
<i>Tabulka 6: Receptura cementu a strusky.</i>	65
<i>Tabulka 7: Receptura cementu a popílku.</i>	65

Seznam grafů

<i>Graf 1: Pevnost v tlaku malt (A) a betonů (B) na bázi alkalicky aktivované strusky / popílek směsi, v závislosti na době vytvrzování (28, 90denní). Jsou také zobrazeny Silné OPC na bázi referenční malty a betonu.[osa x- procentuální zastoupení slag = strusky, fly ash = popílku; osa y – pevnost v tlaku]. [19]</i>	<i>29</i>
<i>Graf 2: Průměrný objem propustných dutin z malt (A) a betonů (B) na bázi alkalicky aktivované strusky / popílku směsi, a OPC, jako funkce doby vytvrzování (28, 90denní). [osa x- procentuální zastoupení slag = strusky, fly ash = popílku; osa y – objem propustných pórů]. [19]</i>	<i>30</i>
<i>Graf 3: Křivka teplotního zatížení</i>	<i>67</i>
<i>Graf 4: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.....</i>	<i>72</i>
<i>Graf 5: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.</i>	<i>72</i>
<i>Graf 6: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.</i>	<i>73</i>
<i>Graf 7: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.....</i>	<i>73</i>
<i>Graf 8: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.</i>	<i>74</i>
<i>Graf 9: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k zatěžování vysokými teplotami.</i>	<i>74</i>
<i>Graf 10: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.</i>	<i>75</i>
<i>Graf 11: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.....</i>	<i>76</i>
<i>Graf 12: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.....</i>	<i>76</i>
<i>Graf 13: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf 14: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.....</i>	<i>77</i>
<i>Graf 15: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) na druhu agresivního prostředí při teplotě prostředí 22°C.....</i>	<i>78</i>

Graf 16: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení CO_2	79
Graf 17: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení CO_2	80
Graf 18: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení CO_2	80
Graf 19: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení SO_4^{2-}	81
Graf 20: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení SO_4^{2-}	82
Graf 21: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení SO_4^{2-}	82
Graf 22: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek	83
Graf 23: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek	83
Graf 24: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek	84
Graf 25: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování	85
Graf 26: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování	85
Graf 27: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a strusky) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování	86
Graf 28: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení CO_2	87
Graf 29: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení CO_2	87
Graf 30: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení CO_2	88
Graf 31: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení SO_4^{2-}	89
Graf 32: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení SO_4^{2-}	89
Graf 33: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení SO_4^{2-}	90

<i>Graf 34: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.</i>	91
<i>Graf 35: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.</i>	91
<i>Graf 36: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení chemicky rozmrazovacích látek.</i>	92
<i>Graf 37: Závislost pevnosti v tlaku správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.</i>	93
<i>Graf 38: Závislost pevnosti v tahu ohybem správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.</i>	93
<i>Graf 39: Závislost objemové hmotnosti správkových malt (z CEM I 42,5 R a popílku) vzhledem k působení cyklického zmrazování a rozmrazování.</i>	94
<i>Graf 40: Porovnání vlivu působení CO₂.</i>	95
<i>Graf 41: Porovnání vlivu působení chemicky rozmrazovacích látek.</i>	96

Seznam obrázků

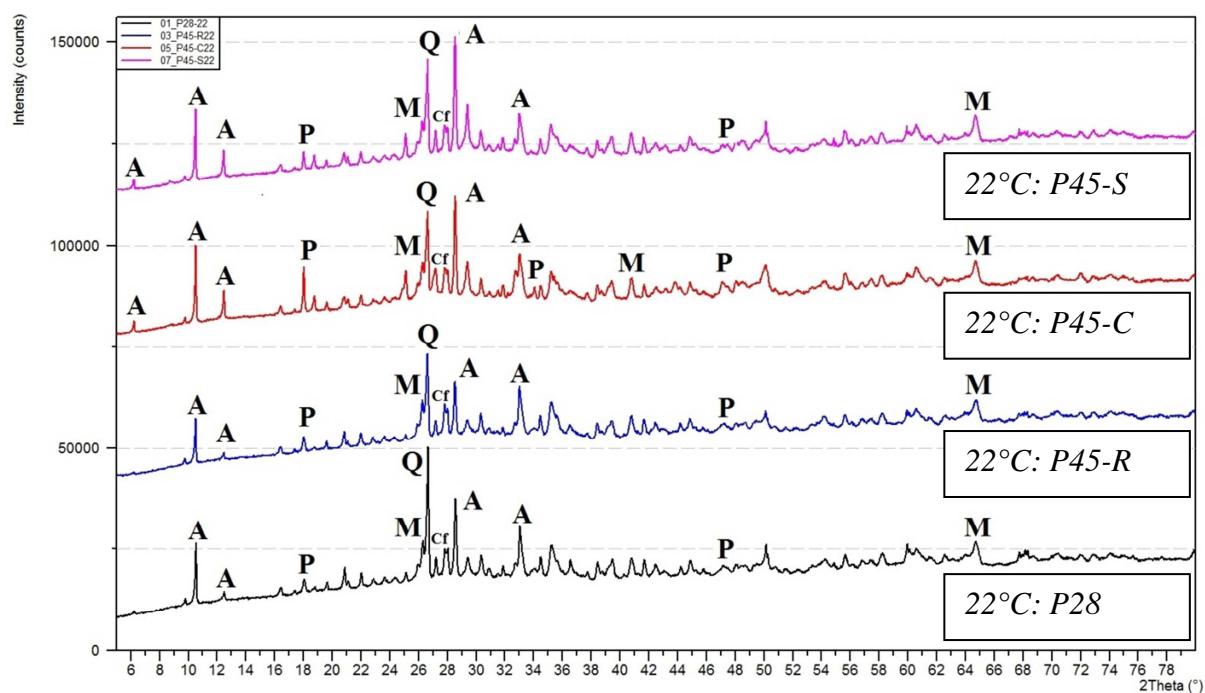
Obrázek 1: Snímky z REM v režimu zpětně odražených elektronů analyzovaných malt ve stáří 90 dnů. [BSF – vysokopecní struska; Partially reacted BSF grain - částečně reagovaná BSF zrna; Partially hydrated PC grain - částečně zhydratovaná PC zrna; BSF grain – BSF zrna; Rim of C-S-H in BSF grain - okraj C-S-H v BSF zrn; Partially reacted PC grain - částečně zreagovaná PC zrna; Rim of C-S-H from PC - okraj C-S-H z PC. Sand Grain – zrno písku]. [21]	14
Obrázek 2: BSE S10 vzorek po 28 dnech vykazuje přítomnost (a) fáze C-N-A-S-H (tmavě šedá), (b) částečně rozpuštěného popílku oblasti (šedá) a (c) částic nezhydratované strusky (světle šedá). [BSE – režim sekundárních elektronů]. [20]	16
Obrázek 3: BSE vzorek S20 po 28 dnech vykazuje přítomnost (a) fáze C-N-A-S-H (tmavě šedá), (b) částečně reaguje popílku koule (šedá), a (c) nezhydratované strusky částic (světle šedá). [20] ..	17
Obrázek 4: BSE S30 vzorku po 28 dnech vykazuje přítomnost (a) fáze C-N-A-S-H (tmavě šedá), (b) částečně reaguje popílku koule (šedá), a (c) nezhydratované strusky částic (světle šedá). [20] ..	17
Obrázek 5: Postup návrhu požární odolnosti konstrukcí. [48]	24
Obrázek 6: Normová teplotní křivka. [32]	25
Obrázek 7: Porovnání hloubky karbonatace u správkových malt (P45 – receptura s popínkem po 45 denním vystavení malt působení CO ₂ , S45 a S90 receptury se struskou po 45 a 90 denním vystavení malt působení CO ₂).	68
Obrázek 8: Referenční malty se struskou na obr. vlevo a popínkem na obr. vpravo zatížené teplotami (sestupně 22°C, 400°C, 600°C, 1000°C).	68
Obrázek 9: Referenční malty se struskou zatížené teplotami (sestupně 22°C, 400°C, 600°C, 1000°C) po působení CO ₂ na obr. vlevo nahoře, SO ₄ ²⁻ na obr. vpravo nahoře, CHRL na obr. vlevo dole, mrazem na obr. vlevo dole.	69
Obrázek 10: Referenční malty s popínkem zatížené teplotami (sestupně 22°C, 400°C, 600°C, 1000°C) po působení CO ₂ na obr. vlevo nahoře, SO ₄ ²⁻ na obr. vpravo nahoře, CHRL na obr. vlevo dole, mrazem na obr. vlevo dole.	70
Obrázek 11: Na vzorcích správkové malty s obsahem strusky po zatížení agresivním prostředím oxidem uhličitým je na obr. vlevo zobrazen kalcit při 50 000 násobném zvětšení a na obr. vpravo je zobrazen portlandit při 30 000 násobném zvětšení.	70
Obrázek 12: Na vzorcích správkové malty s obsahem strusky po zatížení agresivního prostředí oxidem uhličitým jsou na obr. vlevo zobrazeny kuličky popílku při 5000 násobném zvětšení a na obr. vpravo je zobrazeno polypropylenové vlákno při 1000 násobném zvětšení.	71

Seznam použitých zkratek a symbolů

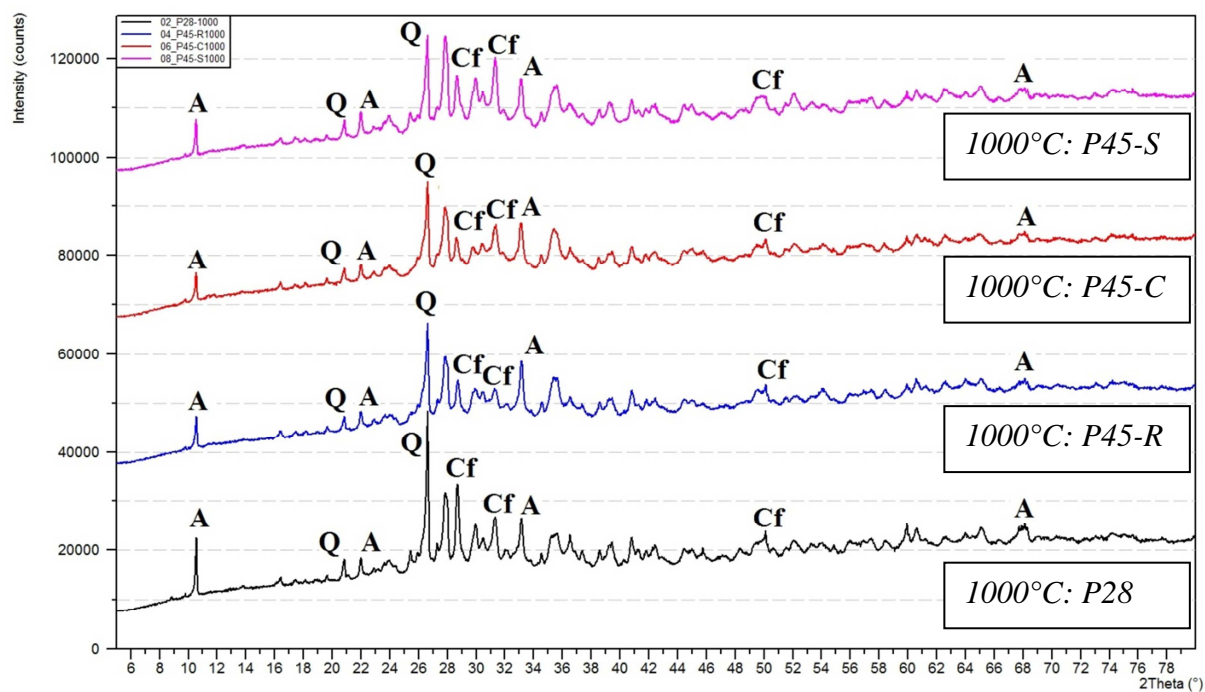
- P28 – R: receptura malty s cementem a popínkem po 28 dnech bez zatížení
- P45 – R: receptura malty s cementem a popínkem po 45 dnech bez zatížení
- P45 – C: receptura malty s cementem a popínkem po 45 denním působení CO_2
- P45 – S: receptura malty s cementem a popínkem po 45 denním působení SO_4^{2-}
- P45 – CH: receptura malty s cementem a popínkem ve stáří 45 dnů vystavena působení chloridů
- P45 – M: receptura malty s cementem a popínkem ve stáří 45 dnů vystavena působení zmrazování
- P90 – R: receptura malty s cementem a popínkem po 90 dnech bez zatížení
- P90 – C: receptura malty s cementem a popínkem po 90 denním působení CO_2
- P90 – S: receptura malty s cementem a popínkem po 90 denním působení SO_4^{2-}
- P90 – CH: receptura malty s cementem a popínkem ve stáří 90 dnů vystavena působení chloridů
- P90 – M: receptura malty s cementem a popínkem ve stáří 90 dnů vystavena působení zmrazování
- S28 – R: receptura malty s cementem a struskou po 28 dnech bez zatížení
- S45 – R: receptura malty s cementem a struskou po 45 dnech bez zatížení
- S45 – C: receptura malty s cementem a struskou po 45 denním působení CO_2
- S45 – S: receptura malty s cementem a struskou po 45 denním působení SO_4^{2-}
- S45 – CH: receptura malty s cementem a struskou ve stáří 45 dnů vystavena působení chloridů
- S45 – M: receptura malty s cementem a struskou ve stáří 45 dnů vystavena působení zmrazování
- S90 – R: receptura malty s cementem a struskou po 90 dnech bez zatížení
- S90 – C: receptura malty s cementem a struskou po 90 denním působení CO_2
- S90 – S: receptura malty s cementem a struskou po 90 denním působení SO_4^{2-}
- S90 – CH: receptura malty s cementem a struskou ve stáří 90 dnů vystavena působení chloridů
- S90 – M: receptura malty s cementem a struskou ve stáří 90 dnů vystavena působení zmrazování
- 22: Referenční teplota $t_1 = 22\text{ °C}$
- 400: Zatěžovací teplota $t_2 = 400\text{ °C}$
- 600: Zatěžovací teplota $t_3 = 600\text{ °C}$
- 1000: Zatěžovací teplota $t_4 = 1000\text{ °C}$
- Δf_c : Změna parametrů pevnosti v tlaku vlivem teploty
- Δf_b : Změna parametrů pevnosti v tahu ohybem vlivem teploty
- ΔOH : Změna parametrů objemové hmotnosti vlivem teploty
- $\Delta f'_c$: Změna parametrů pevnosti v tlaku vlivem agresivního prostředí
- $\Delta f'_b$: Změna parametrů pevnosti v tahu ohybem vlivem agresivního prostředí
- $\Delta OH'$: Změna parametrů objemové hmotnosti vlivem agresivního prostředí

Seznam příloh

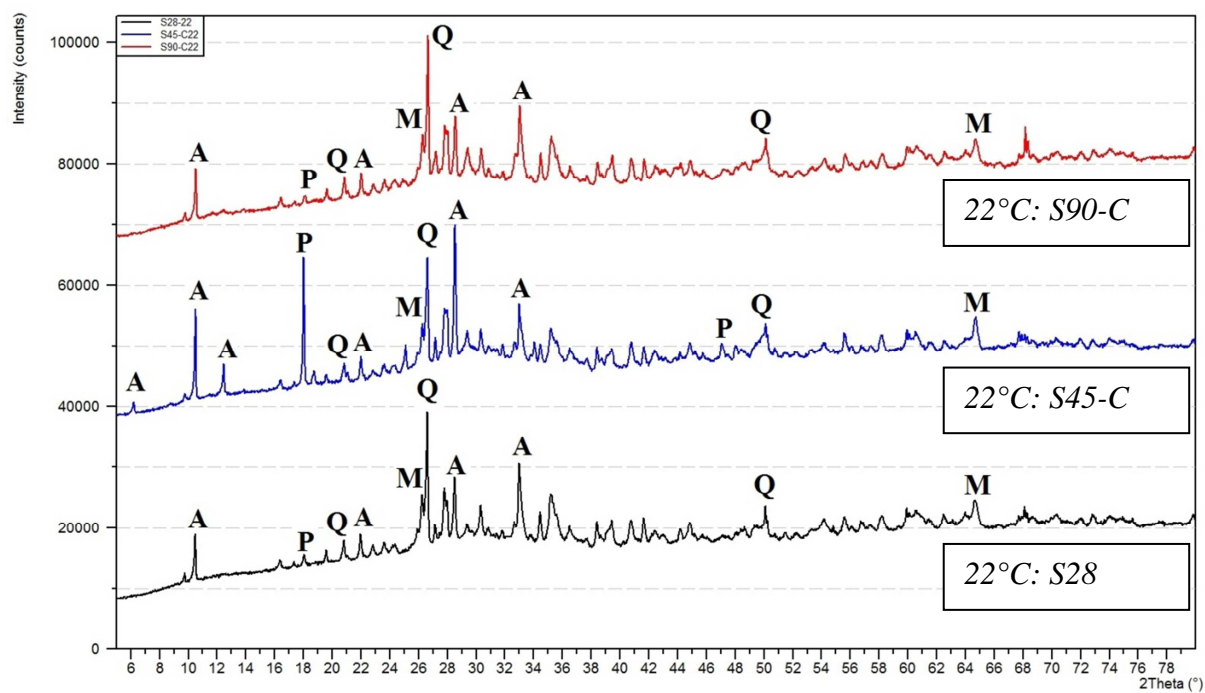
Grafické vyhodnocení XRD analýz



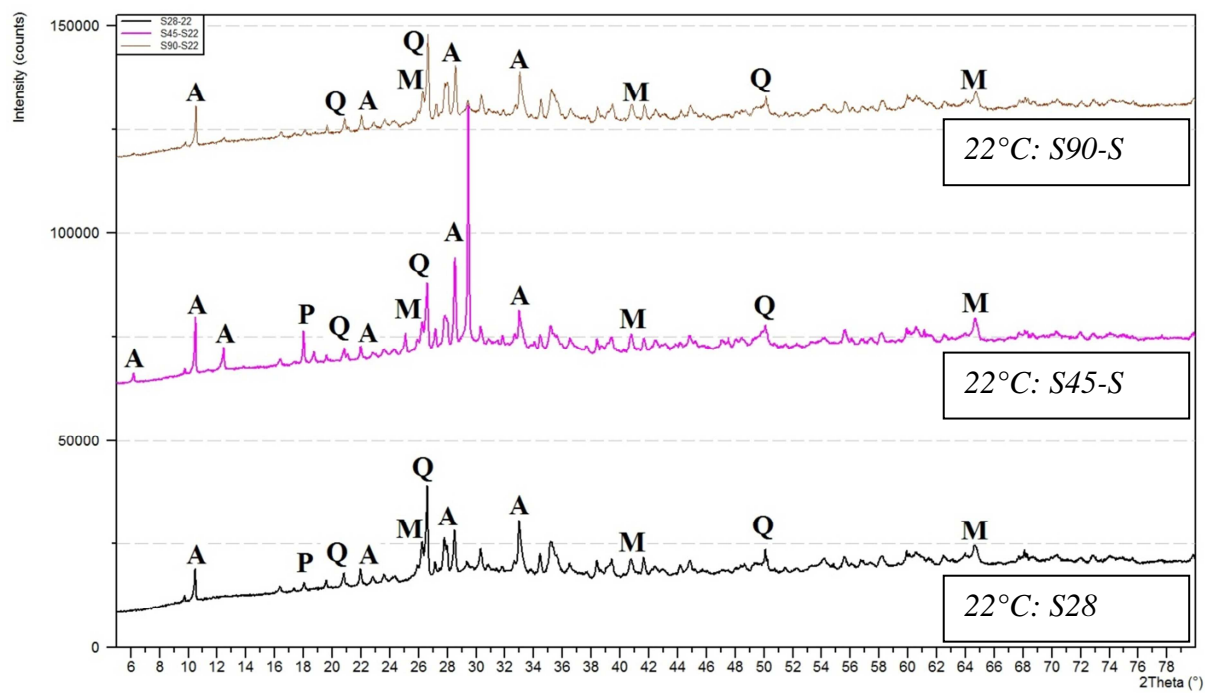
Rentgenograf č. 1 pro teplotu 22°C: P28, P45-R, P45-C, P45-S



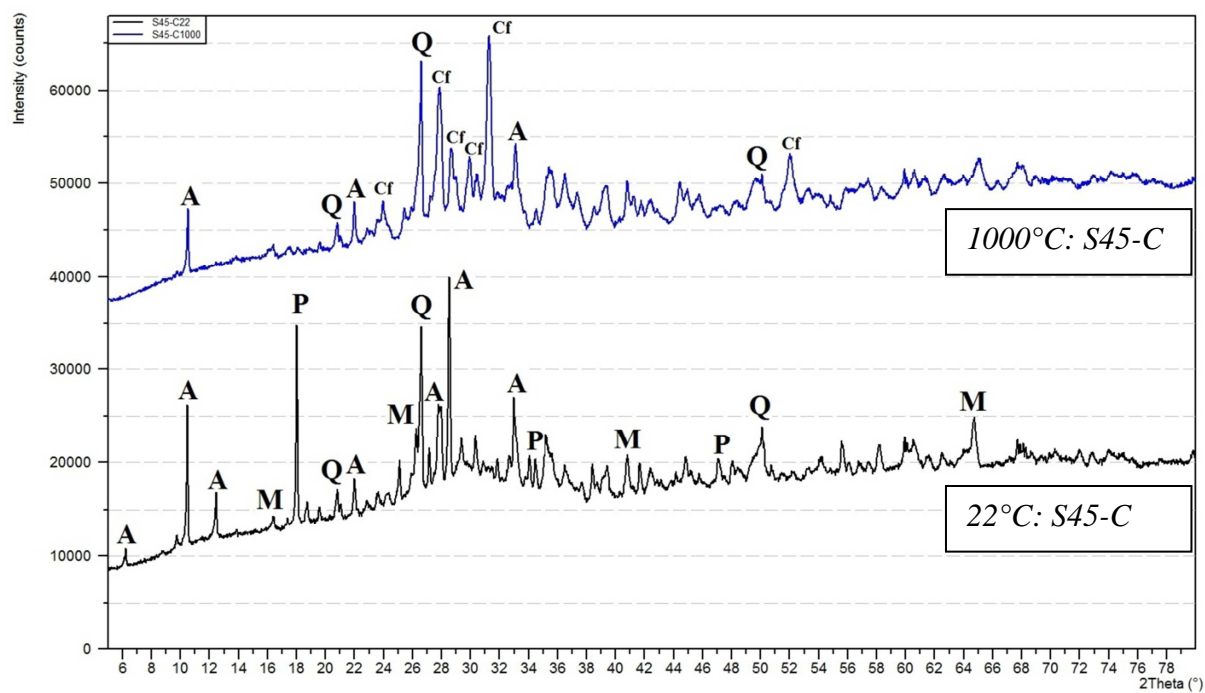
Rentgenograf č. 2 pro teplotu 1000°C: P28, P45-R, P45-C, P45-S



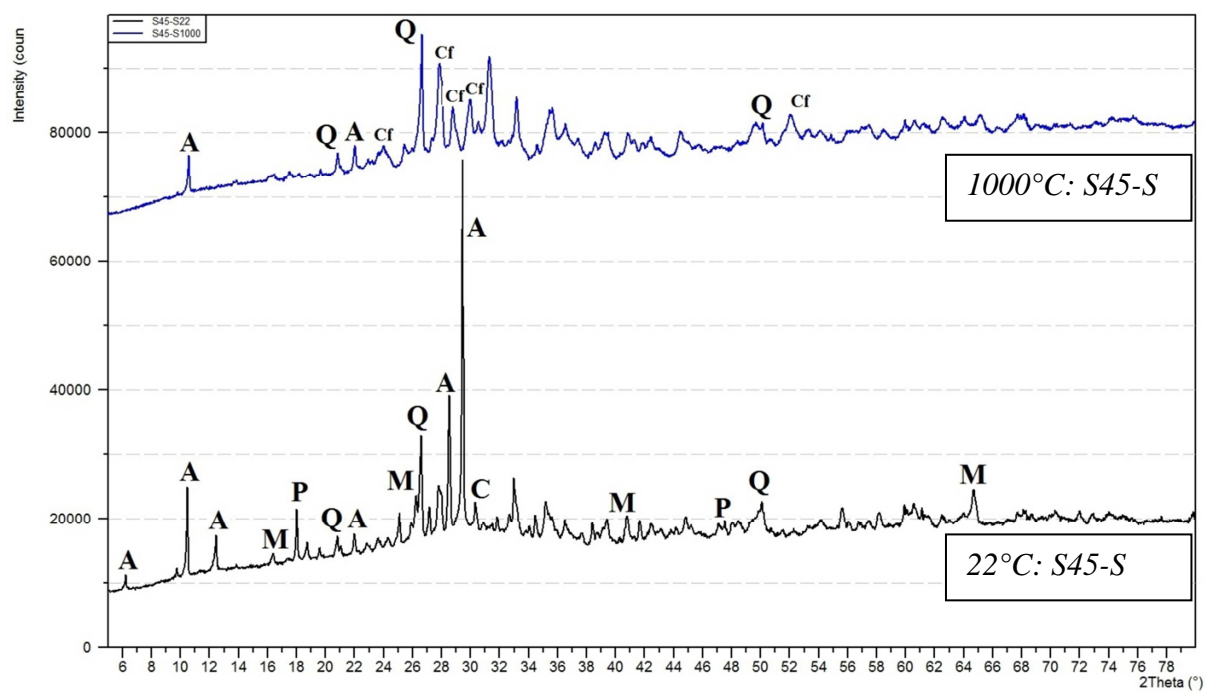
Rentgenograf č. 3 pro teplotu 22°C: S28, S45-C, S90-C



Rentgenograf č. 4 pro teplotu 22°C: S28, S45-S, S90-S



Rentgenograf č. 5 pro teploty 22°C a 1000°C: S45-C



Rentgenograf č. 6 pro teploty 22°C a 1000°C: S45-S

Legenda k rentgenografům:

A - minerály kameniva (Ca, Mg, Fe, Si)

C - CaCO_3

Cf - CaO, NaO

M – Mullit

P - Portlandit - Ca(OH)_2

Q - SiO_2